

Neuartige Methoden diffraktiver Mask Aligner Lithografie zur flexiblen Erzeugung mikrooptischer Strukturen

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt dem Rat der Physikalisch-Astronomischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von M.Eng. Tina Weichelt
geboren am 19.01.1987 in Apolda

Gutachter:

1. *Prof. Dr. Andreas Tünnermann,*
Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena
2. *Prof. Dr. Hartmut Bartelt,*
Leibnitz-Institut für Photonische Technologien e.V.
3. *Prof. Dr. Norbert Lindlein,*
Institut für Optik, Information und Photonik,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Disputation: 2. Juli 2019

„All these things are difficult, but once they're done they seem normal. And that's the magic [not only] of Moore's law.“
Kaizad Mistry (Intel)

Abstract

Nowadays, light is one of the most important tools. Besides the usage of lasers in medicine [1], especially the techniques of laser machining [2] like cutting, welding or labeling, is of very high interest. The latest awarded Nobel Prize in October 2018 emphasizes the significance of research in the field of optics and how it „changes many people’s life, barely visible “ [3]. It was given to the „optical tweezer“, a common tool in biophysics, and to the technique of „Chirped Puls Amplification“, used for eye surgeries for instance.

The invention of integrated circuits (ICs) is another example for optical technologies having an impact on our daily life. In 1958 Jack Kilby (*1923 – †2005) made an elementary contribution to this innovation and today’s digital world. His work has also been honored with the Nobel Prize in 2000.

While the first IC contained only a few transistors, today’s ICs include billions of electronic components, so that processors and memory chips of only a few square millimeter can be realized with a high density of ICs. Without memory chips numerous electronic devices in everyday life would not work. Their fabrication is based on optical lithography, using light as a tool. The development of this technology is driven by Moore’s Law, that has been formulated by Gordon Moore in 1965. It predicts that the number of ICs on a microprocessor doubles roughly every two years. In order to guarantee an optimized fabrication of electronic ICs, a sophisticated lithography technology is needed.

In general, optical lithography enables an efficient generation of highly resolved structures not only for semiconductor components but also for optical elements. For the latter, the leading-edge technology of semiconductor industry, the projection lithography, is not well suited, because its processes are optimized for treating silicon-wafers. Mask aligner lithography can be an alternative. Originally developed for semiconductor industry too, it is versatilely applicable today. Especially the fabrication of micro-optics is of very high interest [4, 5]. Therefore, it is one main topic of this thesis. For the fabrication of ICs, a mask aligner is mainly used in the field of backend-production nowadays. For such subsequently processes to the IC fabrication, the limited resolution of the mask aligner lithography is sufficient [6]. Moreover, mask aligners are also applied for the fabrication of MEMS/MOEMS and CMOS technologies [7, 8].

In the last twenty years, mask aligner lithography has been developed significantly, also improving the resolution limit and therefore allowing nano-optical patterning [9, 10]. As an aim of this thesis, technological extensions have been developed, further increasing the flexibility of primary pattern generation using shadow printing lithography and hence enlarging the possible applications of a standard mask aligner.

Mask aligner lithography offers easy and adjustable manufacturing possibilities for structures of a broad spectrum of elements. For the pattern generation, the photomask and its illumination are significant and powerful parameter for the lithographic process. Both have been used to further improve diffractive mask aligner lithography. In this thesis, different novel photomask technologies and an additionally new mask aligner illumination system have been developed and

are presented here. These photomask technologies include a photomask displacement method for multiple exposures, as well as a double-sided (structured) and multi-level photomasks for individual photoresist patterning, addressing different applications.

Photomask designs for periodic structures are very different to non-periodic ones. For the generation of periodic pattern different methods are discussed, taking a blazed grating as an example for demonstration. The combination of a highly accurate lateral displacement of a conventional binary photomask with locally varying exposure doses is presented as a relatively simple but efficient option for grey-scale lithography. Applying a sequence of six exposures, a blazed structure with 2 μm period was realized in photoresist. Besides grey-scale lithography, this technology also offers possibilities such as double-patterning. For the fabrication of continuous surface profiles, rigorously optimized phase-masks also offer advanced techniques, for instance to generate a customized blazed geometry. That way, a perpendicular back-jump of a one-dimensional blazed grating with 3 μm period was realized.

For the optimization of non-periodic and isolated structures a customized iterative projection algorithm was developed. It calculates a photomask design for an optimized intensity distribution in a certain proximity distance behind the photomask. The number of available degrees of freedom, like the number of amplitude and phase level, has a crucial impact on the performance of the optimization. Usually binary chrome-masks are used for mask aligner lithography. The application of an additional phase-shift, as an additional degree of freedom, improves the feasible resolution of shadow printing significantly. In the end, a two level phase-mask with an additional amplitude modulation by means of a chromium layer was fabricated and tested successfully. Hence, the resolution limitation of conventional proximity lithography was enhanced, resolving 2 μm applying a 30 μm proximity distance.

Another possibility to increase the degrees of freedom is achieved using the backside of the photomask for manipulation the transmitted light. This thesis presents a novel concept and the fabrication of a double-sided structured photomask. The challenging alignment of back and front side was realized successfully by a special developed technology based on diffractive elements. The working principle of the photomask was demonstrated by structuring thick photoresist, as it is needed for through-silicon vias. As an example, an array of 3 x 3 circles with a diameter of 20 μm and a local distance of 40 μm or 50 μm was fabricated in 30 μm thick photoresist. Using the double-sided structured photomask, the exposure time was reduced by a factor of two, compared to an exposure using a conventional binary photomask. Additionally, improved photoresist sidewalls were achieved too.

Despite the optimized illumination system with the conventionally used mercury arc lamp, the pattern generation of high resolution is limited. For optimizing the achievable resolution, the angular spectrum of the photomask illumination needs to be minimized. Using the conventional illumination set-up, including the mercury arc lamp as exposure source, a metal aperture (IFP) in the light path defines the angular spectrum of the photomask illumination. For very small angular spectra, apertures with diameters smaller than 5 mm would be needed, leading to inefficient long exposure times.

In the framework of this thesis, a new illumination system without the application of such limiting IFPs has been developed. A solid-state laser replaces the conventionally used mercury arc lamp. Besides the integration of a laser as an illumination source, a Galvano-scanner enables a dynamic control and a simple adjustment of the angular spectrum of the photomask illumination. This set-up offers a new level of flexibility. The constant irradiance of the photomask independent of the chosen angular spectrum is an essential advantage of the new illumination system using the laser as light source. Hence, also small angular spectra can be used with reasonable exposure time. Experimentally, a reduction of the exposure time up to a factor of 20 has been achieved, compared to exposures using the conventional mercury arc lamp.

This thesis has presented the proof of principle for a novel illumination system applied to a mask aligner. Now, further and new exposure concepts can be developed. For example, a combined application of the photomask displacement technology with locally modulated laser intensity distribution could enable efficient grey-tone lithography of large areas.

In the framework of this thesis, new methods of diffractive mask aligner lithography have been developed further improving shadow printing. Different examples such as the fabrication of blazed gratings, an isolated L-pattern as well as the array of 3 x 3 circles are presented and show fabrication possibilities for a broad spectrum of elements. Novel photomask technologies and the dynamic change of the angular spectrum, using the new illumination system with the laser, also allowing new approaches for the optimization of source and mask together. At the end of this thesis, an overview has been developed helping to find an appropriate combination of photomask technology and photomask illumination in order to gain optimized lithographic results. Potential combination depend on specific properties of the target structure and are deduced as results from this thesis.

Nevertheless, the capabilities of the photomask design or of the illumination system are not fully utilized. An illumination set-up using a LED-array could be another advanced exposure technique. With controlling single LEDs or pixels, the angular spectrum of the photomask illumination could be defined [11, 12]. For an additional resolution enhancement, reducing the illumination wavelength, e.g. DUV-LEDs [13] might be potential light sources.

An additional application of advanced optimization algorithm, like deep learning [14], could significantly develop the photomask design and hence mask aligner lithography further hereafter.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Mikrooptische Strukturen	4
2.1	Herstellungstechnologien.....	5
2.1.1	Mechanische Präzisionsbearbeitung	9
2.1.2	Lithografische Belichtungsverfahren	10
2.1.2.1	Direktschreibende lithografische Herstellung.....	12
2.1.2.2	Maskenbasierende lithografische Herstellung.....	14
2.1.2.3	Interferenzlithografie	17
3	Mask Aligner Lithografie	18
3.1	Einsatzgebiete	18
3.2	Erweiterung der Einsatzgebiete	19
3.3	Funktionsweise des Mask Aligners.....	20
3.3.1	Das Beleuchtungssystem im Mask Aligner.....	22
3.3.2	Maske-Wafer-Ausrichtung.....	26
3.4	Auflösungssteigernde Methoden.....	28
3.4.1	Nahfeldholografie mit Mask Aligner.....	28
3.4.2	Phasenmasken.....	31
3.4.3	Der Talbot Effekt.....	31
3.4.4	Optical Proximity Correction (OPC).....	33
4	Alternative Photomasken-Technologien für individuelle Problemstellungen ...	35
4.1	Erzeugung periodischer Strukturen.....	36
4.1.1	Kontinuierliche Oberflächenprofile mittels lateral verschiebbarer Photomaske ..	40
4.1.2	Rigoros-optimierte Phasenmaske zur Erzeugung kontinuierlicher Profile	47
4.2	Erzeugung isolierter, aperiodischer Strukturen	53
4.3	Doppelseitig-strukturierte Photomaske.....	65
4.3.1	Die Ausrichtung von Vorder- zur Rückseite der Photomaske.....	68
4.3.2	Die Herstellung der doppelseitig-strukturierten Photomaske	70

5	Alternative Belichtungsquelle	73
5.1	Der Laser als Belichtungsquelle	75
5.2	Das Beleuchtungssystem mit integriertem Laser	76
5.2.1	Experimentelle Ergebnisse	84
5.2.2	Weiterführende Optimierungs- und Einsatzmöglichkeiten	93
6	Technologieauswahl Mask Aligner Lithografie	95
7	Zusammenfassung	97
8	Literaturverzeichnis	101
	Abkürzungsverzeichnis	123
	Symbolverzeichnis	125
	Anhang.....	127
	Danksagung	
	Veröffentlichungen	
	Ehrenwörtliche Erklärung	

1 Einleitung

Licht ist heutzutage eines der wichtigsten Werkzeuge. Neben dem Einsatz von Lasertechnologien in der Medizin [1] hat vor allem die Anwendung des Lasers in der Materialbearbeitung [2] wie z.B. zum Schneiden, Schweißen oder Beschriften große Bedeutung. Erst der im Oktober 2018 vergebene Nobelpreis in Physik für die „optische Pinzette“ und das Verfahren namens „Chirped Puls Amplification“ zur Erzeugung hochenergetischer, ultrakurzer optischer Pulse zeigt, welche Bedeutung die Forschung auf dem Gebiet der Optik hat und „kaum sichtbar das Leben vieler Menschen verändern kann“ [3]. So stellt die optische Pinzette ein weit verbreitetes Werkzeug in der Biophysik dar und ultrakurze Laserpulse mit hohen Energiedichten finden beispielsweise Anwendung bei Augenoperationen.

Ein weiteres Beispiel dafür, dass optische Technologien kaum sichtbar Einfluss auf unser tägliches Leben nehmen, betrifft die Erfindung integrierter Schaltkreise (engl. Integrated circuits, ICs). Im Jahr 1958 leistete Jack Kilby (*1923 - †2005) einen grundlegenden Beitrag zur Entwicklung dieser Erfindung, die die heutige digitale Welt ermöglicht hat, wofür er im Jahr 2000 ebenfalls mit dem Nobelpreis geehrt wurde. Während der erste IC nur wenige Transistoren enthielt, umfassen heutige ICs Milliarden an elektronischen Bauelementen, sodass z.B. Prozessoren und Speicherchips, die nur wenige Quadratmillimeter groß sind, mit einer hohen Dichte an Schaltkreisen realisiert werden können. Die Grundlage für die Herstellung von Mikrochips, ohne die die Nutzung zahlreicher elektronischer Geräte heute nicht möglich wäre, bildet die optische Lithografie, die sich das Licht als Werkzeug zu Nutzen macht. Die Entwicklung dieser Technologie ist getrieben vom Moore'schen Gesetz, welches 1965 vom Amerikaner Gordon Moore formuliert wurde, und eine Verdopplung der Anzahl der integrierten Schaltkreise auf einem Mikroprozessor etwa alle zwei Jahre voraussagt. Die dafür notwendigen Lithografiertechnologien sind höchstentwickelt, um eine optimierte Strukturerzeugung elektronischer Schaltkreise zu gewährleisten.

Das Prinzip der optischen Lithografie ermöglicht im Allgemeinen eine effiziente Erzeugung hoch aufgelöster Strukturen, die nicht nur für Halbleiterelemente, sondern auch zur Realisierung optischer Elemente eingesetzt werden kann. Allerdings sind die Geräte der Spitzentechnologie der Halbleiterindustrie, der Projektionslithografie, dafür weniger gut geeignet, da die Prozesse ausschließlich auf die Bearbeitung von Silizium-Wafern optimiert sind. Eine Alternative bietet die Mask Aligner Lithografie, die ebenfalls ursprünglich für die Halbleiterindustrie entwickelt wurde, heute aber weitaus vielseitiger eingesetzt wird. Bei der Herstellung integrierter Schaltkreise findet der Mask Aligner heutzutage vorwiegend Anwendung für „Backend“-Prozesse (Vorgänge im Anschluss an die Fertigung der eigentlichen Leiterbahnen) der Mikrochips, da hier die limitierte Auflösung der Mask Aligner Lithografie für die notwendigen Prozesse ausreichend ist [6].

Auch wenn die Bedeutung des Mask Aligners für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen zurückgegangen ist, hat die Mask Aligner Lithografie insbesondere für mikrooptische Elemente an Wert gewonnen, weshalb die Strukturerzeugung für die Mikrooptik

einen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt. Die Mikrooptik ermöglicht z.B. die Miniaturisierung optischer Systeme und ist daher von sehr hoher Bedeutung für viele Anwendungen. **Kapitel 2** gibt zu Beginn der Arbeit einen Einblick in das Anwendungsspektrum mikrooptischer Elemente, sowie einen allgemeinen Überblick über wichtige Herstellungsverfahren für die Mikrooptik mit dem Versuch, die gewählten Beispiele systematisch zu gruppieren und die Mask Aligner Technologie als eine der Herstellungsmöglichkeiten für Mikrostrukturen einzuordnen. Denn so vielfältig das Spektrum mikrooptischer Elemente ist, so umfangreich ist die Anzahl an Herstellungstechnologien.

Die Mask Aligner Lithografie bietet nicht nur Möglichkeiten für eine wafer-basierte Herstellung für ein breites Spektrum mikrooptischer Elemente, sondern ist z.B. auch ein wichtiges Werkzeug für CMOS oder M(O)EMS Technologien. Um das Einsatzgebiet eines Standard Mask Aligners weiter zu vergrößern, muss zum einen die limitierte Auflösung des Schattenwurfs überwunden werden und zum anderen neue Techniken und Methoden entwickelt werden, die flexible Strukturgenerierungen für verschiedene Anwendungen erlauben. Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Entwicklung solcher fortführender Technologien, die zur Erhöhung der Flexibilität eines Standard Mask Aligner bzw. der Schattenwurf Lithografie hinsichtlich der Primärstrukturherzeugung beitragen, um das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten zu erhöhen.

In den letzten zehn bis zwanzig Jahren hat sich die Mask Aligner Lithografie weiter entwickelt und die Grenze der möglichen Auflösung der Schattenwurf lithografie wurde beträchtlich verschoben, womit auch die Erzeugung nanooptischer Strukturen mit diesem Verfahren möglich wurde [9, 10]. Dabei spielten auch die einst für die Projektionslithografie entwickelten auflösungssteigernden Methoden eine wichtige Rolle, welche teilweise erfolgreich auf die Mask Aligner Lithografie übertragen werden konnten, was auch im Rahmen dieser Arbeit erfolgte.

In **Kapitel 3** steht die Mask Aligner Lithografie im Fokus. Dieses Kapitel widmet sich den Einsatzgebieten der Mask Aligner Technologie und gibt einen Überblick über jüngste Forschungsergebnisse, inklusive der Resultate, die im Rahmen dieser Arbeit erzielt wurden. Darüber hinaus wird in diesem Kapitel die Technologie des Mask Aligners und des verwendeten Beleuchtungssystems vorgestellt. Dabei werden auch wichtige auflösungssteigernde Methoden diskutiert, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet und näher untersucht wurden.

In **Kapitel 4** sowie **Kapitel 5** werden die entwickelten Ergebnisse im Detail präsentiert und diskutiert. Die entstandenen Resultate stützen sich auf zwei wesentliche Schlüsselkomponenten des Mask Aligners, die für eine erfolgreiche Strukturierung von hoher Bedeutung sind: die Beleuchtungsoptik inklusive Beleuchtungsquelle, sowie die Photomaske, als Informationsträger der herzustellenden Strukturen. So beschäftigt sich **Kapitel 4** mit neu entwickelten Photomasken-Technologien für verschiedene Applikationen. Dazu zählt neben der Technologie einer verfahrenbaren Photomaske für Mehrfachbelichtungen, die Technologie mehrstufiger sowie einer doppel-seitig strukturierten Photomaske für die Erzeugung individueller Photoresiststrukturen.

Das Photomaskendesign für periodische und nicht-periodische Zielstrukturen unterscheidet sich wesentlich. Für die Erzeugung periodischer Strukturen werden verschiedenen Methoden beleuchtet. Dabei wird die Herstellung einer Primärstruktur geblazter Gitter als Beispiel diskutiert. Hierfür werden die genutzten Belichtungstechniken der Grautonlithografie mittels verfahrbarer Photomaske sowie die Strukturierung mittels rigoros-optimierter mehrstufiger Photomaske präsentiert.

Für die Optimierung aperiodischer Photomaskenstrukturen wurde ein iterativer Algorithmus entwickelt, der unter Berücksichtigung herstellungsrelevanter Kriterien ein Photomaskendesign für eine optimierte Intensitätsverteilung in einem bestimmten Abstand hinter der Photomaske berechnet. Mit der Verwendung einer zusätzlichen Phasenstruktur und einem somit weiterem Freiheitsgrad kann die erreichbare Auflösung der Schattenwurf lithografie signifikant verbessert werden, wie am Beispiel aperiodischer Strukturen gezeigt wird. Der verwendete Algorithmus sowie exemplarische Strukturierungsergebnisse werden diskutiert. Aber auch die Strukturierung der Photomaskenrückseite bietet eine weitere Möglichkeit, Freiheitsgrade zur Manipulation des transmittierenden Lichtes zu schaffen. Hierfür werden Designmöglichkeiten sowie die Herstellung einer doppelseitig strukturierten Photomaske vorgestellt. Ein zentraler Punkt ist dabei die exakte Ausrichtung der vorder- und rückseitigen Elemente, wofür eine eigens entwickelte Technologie basierend auf diffraktiven Strukturen entwickelt worden ist.

Trotz des optimierten Beleuchtungssystems für die Verwendung einer Quecksilberdampf lamp e als Beleuchtungsquelle ergeben sich unüberwindbare Limitationen für die Herstellung hoch aufgelöster Strukturen. Die Notwendigkeit einer hoch kollimierten Photomaskenbeleuchtung verursacht ineffiziente Belichtungszeiten. **Kapitel 5** stellt mit der Verwendung eines Lasers als Beleuchtungsquelle eine Möglichkeit vor, die im konventionellen Beleuchtungssystem bestehenden Limitationen zu überwinden. Ein dafür neu entwickeltes Beleuchtungssystem erlaubt eine vorher nicht verfügbare Flexibilität in der Definition des Beleuchtungsspektrums der Photomaske mit Hilfe eines Galvano-Scanners, welche an die „Flexray-Beleuchtung“ [15] der Projektionslithografie erinnert. Die experimentellen Ergebnisse und insbesondere die Verbesserung der Belichtungszeiten aufgrund einer konstanten Bestrahlungsstärke unabhängig des verwendeten Winkelspektrums der Photomaskenbeleuchtung demonstrieren die erfolgreiche Realisierung sowie die Vorteile des neu entwickelten Beleuchtungssystems des Mask Aligners. Das **Kapitel 5** schließt mit einem Ausblick zu Optimierungs- sowie Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie ab.

In **Kapitel 6** wird eine abschließende Übersicht für die Mask Aligner Lithografie präsentiert, die in Abhängigkeit definierter Eigenschaften der Zielstruktur aufzeigt, welche potenziellen Kombinationen von Photomaske und Maskenbeleuchtung zur optimalen Strukturierung geeignet sind.

Am Ende der Arbeit, in **Kapitel 7**, werden die entwickelten Technologien und erarbeiteten Ergebnisse abschließend noch einmal zusammengefasst.

2 Mikrooptische Strukturen

Als Elemente der Mikrooptik werden einerseits Einzelbauelemente bezeichnet, deren laterale Dimension weniger als 1 mm messen. Andererseits umfassen mikrostrukturierte Optiken Elemente, deren laterales Abmaß bei weitem größer sein kann, aber deren Strukturgröße im Mikrometerbereich liegt. In der Mikrooptik finden sich auch bekannte Elemente der klassischen Optik wie Prismen, Linsen, Spiegel, Blenden, Filter oder Phasenplatten wieder. Element- oder Strukturgrößen sind vergleichbar mit uns bekannten biologischen Objekten, wie dem menschlichen Haar mit ca. 60 μm . Abbildung 1 zeigt verschiedene mikrooptische Strukturen im Größenvergleich mit ausgewählten biologischen Objekten. Oft ist die Biologie eng mit der Optik verbunden. So sind Mottenaugen Vorbild für Entspiegelungsschichten [16], oder Insektenaugen für ultraflache Kameras mit Mikrolinsenarrays [17].

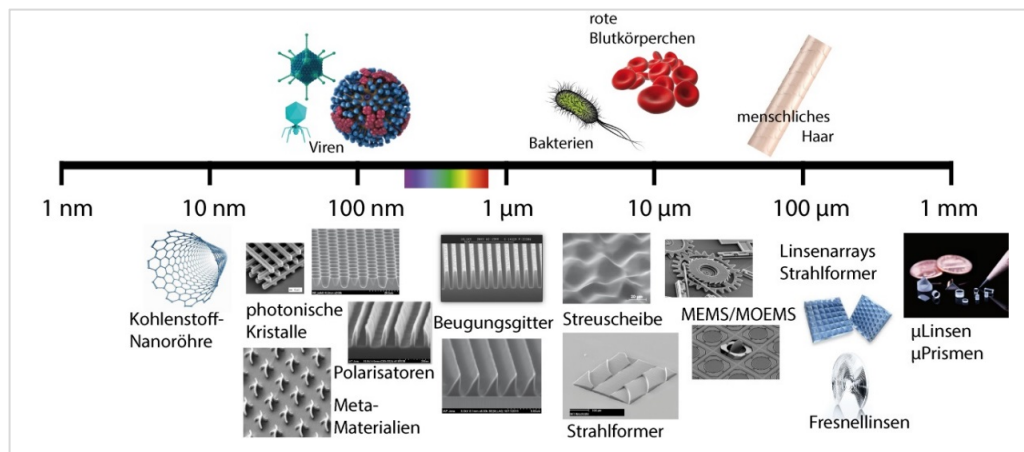


Abbildung 1: Mikro- und nanooptische Strukturen im Größenvergleich mit biologischen Objekten. Einzelne Bilder wurden verschiedenen Quellen entnommen: [18 - 33].

Mikrostrukturierte Optik erlaubt die Integration verschiedener optischer Funktionalitäten, um komplexe optische Systeme zu miniaturisieren. Elemente werden planar zu Arrays kombiniert, wie z.B. als Mikrolinsenarray oder auch als dreidimensionale Aufbauten verschiedener Elemente verknüpft. So können kosteneffiziente Lösungen geschaffen und neue Anwendungen realisiert werden. Die wohl wichtigsten mikrooptischen Elemente sind Beugungsgitter zur spektralen Zerlegung des Lichtes [34]. Aber auch für Linsenarrays mit refraktiver und diffraktiver Wirkung besteht ein hohes Interesse an deren Entwicklung und Fertigung, z.B. als Strahlformer für komplexe Beleuchtungssysteme [35]. Auch kompakte opto-elektronische oder optische mikroelektronisch-mechanische Systeme (optische MEMS, MOEMS) beinhalten diverse mikrooptische Elemente und werden überall in unserem täglichen Leben, von der Allgemeinheit häufig unbemerkt eingesetzt [36 - 38].

Da das Spektrum der Anwendungen für mikrooptische Elemente breit gefächert ist, bedarf es sehr flexibler Herstellungsprozesse, die präzise auf verschiedene Anforderungen angepasst werden können. Es gibt eine Vielzahl von Technologien und Prozessen, die genutzt werden können, um Elemente meist auf verschiedene Art und Weise herzustellen. Jede Technologie

besitzt abhängig von den Spezifikationen des zu fertigenden Elementes Vor- und Nachteile. Wichtig ist, Vorzüge bestimmter Technologien zu nutzen, um eine auf die Applikation und das verwendete Elementmaterial abgestimmte Herstellung sicherzustellen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über wichtige Herstellungsmöglichkeiten für mikrooptische Strukturen. Dabei werden vor allem die Unterschiede der einzelnen Verfahren, sowie ihr Anwendungsspektrum diskutiert.

2.1 Herstellungstechnologien

Für die Herstellung mikrooptischer Elemente gibt es viele verschiedene Verfahren und Technologien. Das Spektrum reicht von wirtschaftlich etablierten Verfahren bis zur alleinigen Verwendung in der Grundlagenforschung. Dieses Kapitel gibt einen Überblick bedeutender Verfahren mit dem Versuch, diese Auswahl systematisch einzuordnen, wie in Abb. 2 dargestellt. Eine Zusammenfassung dieser Technologien mit wichtigen Kenngrößen und Referenzen befindet sich im Anhang 1 (Tabelle 1).

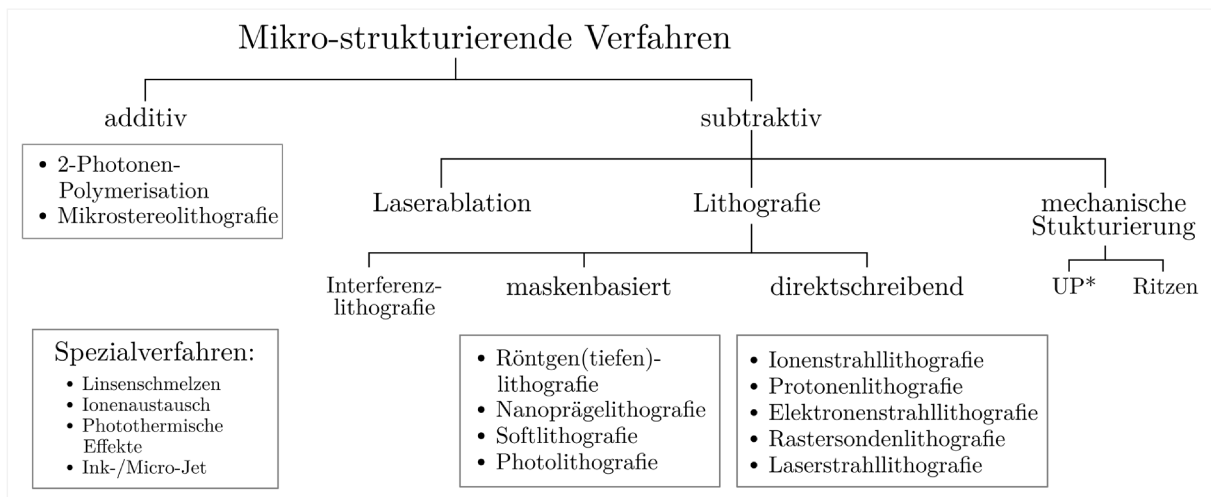


Abbildung 2: Systematische Einordnung einer Auswahl bedeutender Verfahren zur Herstellung mikrooptischer Strukturen. * Ultrapräzisionsbearbeitung (UP)

Im Rahmen dieser Arbeit besteht das Interesse vor allem in der Verwendung von Technologien, deren Entwicklung ausreichend optimiert für einen wirtschaftlichen Einsatz ist. Darüber hinaus besteht der Anspruch an ein flexibles, aber auch effizientes Verfahren für die Herstellung diverser Komponenten hoher Strukturauflösung. Oftmals besteht genau darin ein Widerspruch. Flexible Herstellungsverfahren für hoch aufgelöste Strukturen sind meist nicht geeignet für die Fertigung großer Stückzahlen. Dies soll im Folgenden kurz erläutert werden.

Eine sehr hohe Flexibilität hinsichtlich möglicher Strukturierungsgeometrien wird von unterschiedlichen **direktschreibenden Verfahren** gewährleistet. Eine sequentielle, mechanische *Ultra-Präzisionsbearbeitung* [39], oder lithografisch direkt strukturierende Verfahren wie die *Ionen-* [40 - 42], *Protonen-* [43 - 45], *Elektronenstrahlolithografie* [46], die *Rastersondenlithografie* [47, 48] oder das *Laserstrahlschreiben* [49] ermöglichen die flexible Herstellung verschiedenster Strukturen. Darüber hinaus gibt es additive Verfahren, wie die *2-Photonen-Polymerisation* [50 - 52], die *Mikrostereolithografie* [53 - 55] oder subtraktive

Verfahren wie die *Laserablation* [56 - 58], die ebenfalls eine sehr flexible Herstellung aufgrund ihrer sequentiellen Bearbeitung gewährleisten können.

Die *Ultrapräzisionsbearbeitung*, wie auch die *Elektronenstrahlolithografie* und das *Laserschreiben* sind bedeutende und etablierte Verfahren für die kommerzielle Herstellung von Mikrooptiken. Die mechanische *Präzisionsbearbeitung* erlaubt eine direkte Strukturierung einer Vielzahl von mikrooptischen Elementen, wie z. Bsp. Gitter, Spiegel, Mikrolinsen. Eine spezielle Form der mechanisch direkten Strukturierung ist das *Ritzen* [59], welches allerdings ausschließlich für die Herstellung optischer Gitter eingesetzt wird. Eine Alternative zur mechanischen Strukturierung stellt die lithografische Strukturierung z.B. mittels *Elektronen-* oder *Laserstrahl* dar. Beide Verfahren bieten eine flexible Herstellung diverser Strukturen, sind allerdings wie auch die zuvor genannten Verfahren, für keine Massenfertigung tauglich. Diese Verfahren werden aufgrund ihrer Bedeutung für die Mikrooptik in den folgenden Kapiteln 2.1.1 und 2.1.2.1 hinsichtlich ihrer Anwendungen sowie ihrer Stärken und Limitationen verglichen und diskutiert.

Verfahren wie die *Ionen-*, die *Protonenstrahlolithografie* und die *Rastersondenlithografie* (engl. Scanning-Probe, z. Bsp. Dip-Pen Lithography [60]) werden vorrangig in der Grundlagenforschung oder im Bereich Forschung und Entwicklung eingesetzt. Die Ionen- und Protonenstrahlolithografie werden meist genutzt, um individuelle, dreidimensionale Prototypen, oft mit hohen Aspektverhältnissen*, herzustellen. Die Rastersondenlithografie findet vorwiegend Einsatz, um Nanopartikel oder Moleküle selektiv und lokal auf Substraten zu platzieren [61]. Die genannten Verfahren können lateral sehr hohe Auflösungen generieren, aber die sequentielle Bearbeitung ist sehr zeitintensiv und erlaubt keine effiziente Strukturierung anwendungsrelevanter Flächen. Teure und komplexe Anlagentechnologien, insbesondere der Ionen- oder Protonenstrahlolithografie, sind unattraktiv für eine wirtschaftliche Fertigung mikrooptischer Elemente.

Verfahren, wie die *Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP)* sowie die *Mikrostereolithografie*, oder auch die *Laserablation* werden u.a. zur direkten Herstellung von mikrooptisch strukturierten Endprodukten genutzt. Die ebenfalls sequentielle Bearbeitung erfordert enormen zeitlichen Aufwand für die Herstellung. Aus diesem Grund werden diese Verfahren vorrangig zum Prototypenbau oder in der Forschung und Entwicklung eingesetzt.

Anders als direktschreibende Verfahren, sind **maskenbasierte Strukturierungsverfahren** weniger flexibel, aber weitaus effizienter. Die Strukturierung erfolgt meist gleichzeitig auf großen Flächen und ermöglicht somit eine Herstellung mit relativ geringem Zeitaufwand. Somit können auch große Stückzahlen effizient hergestellt werden. Die Verwendung von Masken findet man in Verfahren wie der *Photo-* [6, 62], *Röntgen-* [63, 64], sowie *Nanopräge-* [65, 66] oder auch *Softlithografie* [67, 68].

Die Verwendung von Röntgenstrahlung bedeutet die Nutzung einer extrem kurzen Wellenlänge, geringere Beugungseffekte an Maskenstrukturen und die damit verbundene Erzeugung hoch

* Als Aspektverhältnis wird das Verhältnis aus der Tiefe bzw. Höhe einer Struktur zu ihrer (oft kleinsten) lateralen Ausdehnung bezeichnet.

aufgelöster ($<20\text{ nm}$) sowie tiefer Strukturen. Allerdings sind Röntgenstrahlen sehr schwer zu kollimieren und zu fokussieren [5]. Komplexe Anlagentechnologien und aufwändige Photomasken erlauben bisher keinen kommerziellen Einsatz.

Historisch kommerziell weitaus erfolgreicher ist die Historie der Photolithografie. Die Ursprünge der Photolithografie liegen in der Herstellung integrierter Schaltkreise. In den 1970er Jahren wurden planare lithografische Herstellungsverfahren der Schattenprojektion adaptiert, um auch optische Elemente, wie Strahlteiler oder auch Linsenarrays, zu fertigen. Durch die Halbleiterindustrie wurde die Entwicklung der lithografischen Technologien immer weiter vorangetrieben. Daraus resultierte eine spezielle Form der Photolithografie: die Projektionslithografie. Die Projektionslithografie wurde speziell für die Halbleiterfertigung entwickelt und optimiert, um elektronische Chips in sehr hohen Stückzahlen für kommerzielle Elektronikprodukte herzustellen. Diese Technologien zählen zu den am besten entwickelten und fortschrittlichsten. Damit ist es möglich kleinste Strukturdimensionen $<25\text{ nm}$ [69, 70] von höchster Qualität optisch herzustellen. Die Anschaffungskosten für solche Anlagen (s. Anhang 2, Tab. 1) sind sehr hoch und für die Fertigung von mikrooptischen Elementen im Allgemeinen unrentabel. Darüber hinaus wird für die Fertigung von Optiken ein Prozess benötigt, der es auch ermöglicht, dicke sowie transparente Materialien zu strukturieren. Dies leisten diese Anlagen nicht, da sie für Prozesse mit Silizium-Wafern optimiert sind.

Die ursprüngliche Photolithografie, basierend auf der Schattenprojektion, profitierte ebenfalls von den Entwicklungen der Projektionslithografie und adaptierte diese für die Herstellung mikrooptischer Elemente, auch wenn sich die Anforderungen an die Technologie z.B. bzgl. der lateralen Ausdehnung unterscheiden. Für die Fertigung optischer Komponenten ist weniger eine sehr hohe Auflösung, viel mehr die Flexibilität und eine kosteneffiziente Fertigung von Bedeutung. Insbesondere maskenbasierte lithografische Verfahren bieten kosteneffiziente Herstellungsmöglichkeiten. In Kapitel 2.1.2.2 werden verschiedene Methoden vorgestellt und diskutiert.

Darüber hinaus gibt es Verfahren, die auf anderen lithografisch strukturierenden Technologien, wie der Elektronenstrahl- oder Photolithografie aufbauen. Die Techniken der Nanopräge- oder Softlithografie nutzen die hochauflösende Strukturierung mittels Elektronenstrahl für die Fertigung einer Originalstruktur, einer Art Stempel, um kostengünstige Vervielfältigungen mittels Prägeverfahren herzustellen. Andere Verfahren, wie das Linsenschmelzen oder die Inkjet Drucktechnik nutzen beispielsweise die Photolithografie für Vorstrukturierungen. Diese Technologien wurden speziell für die Herstellung mikrooptischer Linsen und Linsenarrays entwickelt. Sie sind daher nicht sehr flexibel, aber sehr effizient.

Das **Linsenschmelzen** ist ein einfaches und spezialisiertes Verfahren zur Herstellung hochqualitativer refraktiver Linsen und Linsenarrays [71 - 76]. Oberflächenspannung in Flüssigkeiten kann exzellente sphärische Oberflächen formen. Ein einfaches Beispiel ist ein Wassertropfen auf einem Blatt. Das gleiche Prinzip wird verwendet, um Mikrolinsen oder -arrays herzustellen. Mittels Photolithografie werden dafür Zylinder aus einem lichtempfindlichen Polymer vorstrukturiert. Bei anschließender Erhitzung geht die Struktur in einen materialabhängigen flüssigen bis gummiartigen Zustand über. Durch die Oberflächenspannung

ergibt sich dabei näherungsweise eine sphärische Oberfläche aus Polymer [77]. Der Durchmesser der Mikrolinsen, sowie deren Position können mit lithografischer Genauigkeit definiert werden [78]. Allerdings wird die Strukturgröße auch gleichzeitig durch das verwendete Verfahren der Photolithografie charakterisiert sowie limitiert. Mit einer Verbesserung der Photolithografie kann so z.B. auch das Linsenschmelzen weiterentwickelt werden.

Eine ähnliche Art der lithografischen Vorstrukturierung wird für das **Inkjet/Microjet Verfahren** genutzt. Die Technologie von Ink- bzw. Microjet wird im Allgemeinen genutzt, um verschiedenste Materialien auf unterschiedliche Arten individuell zu positionieren [79]. Die verwendete Methodik des Dispensierens einzelner Tropfen mittels einer Düse gewährleistet eine sehr gute Reproduzierbarkeit jedes einzelnen Tropfens und somit jeder einzelnen Linse [80]. Um die Kontrolle über die Platzierung und die Form der Linse(n) zu erhöhen, werden mittels Photolithografie Podeste vorstrukturiert [81]. Vor allem die Herstellung refraktiver Linsen bzw. Linsenarrays kann mit dem Microjet Druckverfahren kostengünstig erfolgen [82 - 84]. Darüber hinaus eignet sich das Verfahren ebenso für eine schnelle Herstellung von optischen Musterteilen (Rapid Prototyping), sowie individualisierter Mikrolinsenarrays oder auch von Wellenleitern [80, 81, 84 - 86]. Unterschiedliche Verfahren (kontinuierlich, drop-on-demand) erlauben die Fertigung großflächiger aber auch einzelner, individuell positionierbarer Elemente [86 - 88]. Die selektive Materialplatzierung garantiert ressourcenschonende Fertigung und somit Kosteneffizienz.

Das Mikro-Jet Verfahren findet vor allem Anwendung in der Herstellung von LEDs, Displays und Sensoren, sowie für optische Elemente für die Laserstrahlformung [89 - 91]. Da die Bearbeitung allerdings sequentiell erfolgt, können lange Bearbeitungszeiten entstehen. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens sind die erreichbaren lateralen Dimensionen. Auch wenn man hinsichtlich der Linsengröße innerhalb eines Arrays relativ flexibel ist, so ist die realisierbare Linsengröße eingeschränkt. Typischerweise werden Linsen mit Durchmessern zwischen 20 μm und 5 mm hergestellt. Linsendurchmesser kleiner als 10 μm sind nur schwierig zu generieren [81, 92].

Die mittels Linsenschmelzen bzw. dem Microjet Verfahren hergestellten Linsen entstehen meist aus Photoresist bzw. aus einem Polymer. Einige Photoresiste stellen kein geeignetes Material für Mikrolinsen bestimmter Anwendungen dar. Das ist hauptsächlich der hohen Absorption, sowie der limitierten thermischen und mechanischen Stabilität des Materials geschuldet. Daher wird das Oberflächenprofil des Resistes in einem weiteren Bearbeitungsschritt in geeignetere Materialien, wie Glas (z.B. Kieselglas) oder Halbleiter (z.B. Silizium) übertragen oder mittels Abformtechnik reproduziert [71 - 94].

Für die Herstellung von Glaslinsen gibt es weitere spezielle Verfahren. Dafür nutzt man beispielsweise photothermische Effekte [92, 95] oder die Methodik des Ionenaustausches im Glass [96, 97]. So werden u.a. auch Gradientenoptiken (engl. gradient index, GRIN), oder Wellenleiter hergestellt [98 - 100].

2.1.1 Mechanische Präzisionsbearbeitung

Die mechanische Teilung ist die älteste Variante, optische Gitter herzustellen. Joseph von Fraunhofer (1787-1826), dem gelegentlich auch die Erfindung des Gitters zugeschrieben wird*, baute die erste Gitterteilmaschine. Damit war es möglich, mittels einer Diamantspitze Furchen in z.B. mit Gold beschichtetes Glas zu ritzen [101]. Seitdem wurde diese Art der Maschine weiter entwickelt [102 - 104] und so z.B. mit einem interferometrischen Messsystem ausgestattet. Die Gitterfertigung erlangte dabei vor allem für spektroskopische Anwendungen eine entscheidende Bedeutung.

Gitterteilmaschinen ermöglichen das Ritzen von Gittern mit sehr hoher Präzision und geringem Streulicht, sowie einer hohen Auflösung (bis zu 10.800 Linien/mm) und sehr guter Homogenität [105, 106]. Allerdings haben Gitterteilmaschinen auch entscheidende Nachteile. Die sequentielle Bearbeitung macht diesen Prozess extrem langsam. Große Gitter herzustellen kann Wochen, oder sogar Monate dauern, was diese Technologie unökonomisch macht. Darüber hinaus besitzt die eingesetzte Diamantspitze nur eine begrenzte Lebenszeit. Ein 300 mm x 300 mm großes Gitter mit 400 nm Periode bedeutet eine totale Furchenlänge von 230 km und einen damit einhergehenden, nicht vernachlässigbaren Werkzeugverschleiß [107]. Bei der Herstellung von Gittern mit dieser Größe kann es somit z.B. zu nicht unerheblichen Abweichungen der Furchenform kommen. Darüber hinaus stellen Vibrationen sowie Verunreinigungen während des Prozesses eine große Herausforderung dar [108].

Eine Alternative zur Herstellung optischer Gitter mittels Gitterteilmaschinen ist die spanende Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen [59]. Die Zerspanungstechnik ist eine bedeutende Technologie zur Herstellung miniaturisierter Teile und Komponenten. Unterschiedliche Technologien, wie das Diamantdrehen oder -fräsen, beruhen auf dem Prinzip der selektiven Materialabtragung. Dies verursacht ebenfalls lange Bearbeitungszeiten. Ähnlich wie beim Ritzen kann dies insbesondere für mikrostrukturierte Oberflächen ebenfalls bis zu Tagen beanspruchen, was ein wesentlicher Nachteil der Ultra-Präzisionsbearbeitung (UP) ist.

Dementgegen besteht ein großer Vorteil der UP darin, dass viele unterschiedliche Materialien wie z.B. bestimmte Metalle, Halbleiter, Keramiken, optische Gläser oder auch Kunststoffe bearbeitet werden können. Eine mehrachsige Bearbeitung ermöglicht weiterhin die Fertigung komplexer mikrostrukturierter Oberflächen bis hin zu Freiformoberflächen. Die Erzeugung dreidimensionaler Profile oder variabler Aspektverhältnisse einer Oberfläche sind Beispiele der zahlreichen Einsatzmöglichkeiten der Ultrapräzisionszerspanungstechnologien mittels einkristallinen Diamantwerkzeugen [109]. Vor allem für die Herstellung dreidimensionaler Strukturen oder hoher Aspektverhältnisse, bei der lithografische Prozesse schwierig oder sogar unmöglich sind, bietet die Ultra-Präzisionsbearbeitung eine bedeutende Alternative. Die herstellbaren Strukturgrößen sind allerdings limitiert und schränken somit das Fertigungsspektrum ein. Mehr als 250 Linien/mm stellen für gedrehte Gitter eine Herausforderung dar. Für mikrostrukturierte Oberflächen können Subgeometrien mit

* Die eigentliche Erfindung geht zurück auf D. Rittenhouse 1786 [300].

Dimensionen bis zu 100 nm klein hergestellt werden, wobei es sich dann meist nicht um Standardprozesse handelt [39, 110].

Verschiedene Werkzeuge sowie der Einsatz verschiedener Verfahren, wie z. B. „fly-cutting“ oder „slow/fast tool servo“ ermöglichen eine bestmögliche Realisierung unterschiedlicher Oberflächengeometrien [109 - 111] bzw. die Herstellung komplexer Strukturen wie Arrays, Freiformflächen [39, 112 - 115] oder auch optische Gitter und andere mikrooptische Strukturen auf gekrümmten Oberflächen [116]. Vor allem letzteres bietet einen Vorteil gegenüber weitaus teureren, direktschreibenden Verfahren wie der Elektronenstrahlolithografie (Kapitel 2.1.2.1). So entstehen mittels Diamantbearbeitung verschiedenste Elemente [39, 109, 117] z. B. für Projektionssysteme, Displays, Laser Scanner, sowie medizinische Geräte, Beleuchtungssysteme, oder auch Hologramme [118 - 120], optische Metallspiegel für Laser- oder astronomische Anwendungen [121, 122], sowie Mikro-Rückstrahler z.B. als Sicherheitsreflektoren für Kleidung oder andere Messanwendungen [111].

Gedrehte optische Teile sind nach der Bearbeitung allerdings gekennzeichnet durch ein periodisches „Drehmuster“. Ohne eine Nachbearbeitung kann dies zu unerwünschten Beugungs- und/oder Streueffekten führen [123]. Mittels geeigneter Nachbearbeitung/Glättung kann die Oberfläche korrigiert werden. Politur- und Formkorrekturtechniken wie z. Bsp. Laser- oder Ionenbestrahlung (engl. Ion beam figuring, IBF) oder chemisch-mechanisches (engl. Chemical-mechanical polishing, CMP) sowie magnetorheologisches Polieren (engl. Magneto-rheological finishing, MRF), können die Mikrorauheit sowie die Formabweichung der Elementoberfläche deutlich reduzieren [124 - 131].

Mit einer geeigneten Wahl der Herstellungsverfahren, immer abhängig von den benötigten Spezifikationen des Elementes, kann die Oberflächenrauheit verringert werden, die eine wesentliche Ursache für Streulicht ist [132]. Die Kantenschärfe des Diamantwerkzeuges erlaubt bereits für viele optische Anwendungen eine ausreichende Oberflächengüte, wie z.B. für Metalloptiken. Die Rauheit ist eine der wichtigsten Eigenschaften von optisch-funktionalen Oberflächen. Sie hat einen bedeutenden Einfluss auf die optische Leistungsfähigkeit des Elementes und ggf. auch auf das ganze System [133, 134], wie beispielsweise für astronomische [135] oder lithografische Optiken [136]. Die Oberflächenqualität kann zu Qualitätsverlusten für astronomische Beobachtungstechnologien oder in der lithografischen Herstellung führen.

2.1.2 Lithografische Belichtungsverfahren

Das Wort Lithografie stammt von den griechischen Wörtern „lithos“ und „graphein“, was so viel bedeutet wie „auf Stein schreiben“. Der Steindruck wurde im 18. Jahrhundert erfunden und diente zur Vervielfältigung einer Druckvorlage aus Stein. Überträgt man diese Bedeutung sinngemäß auf die heutige Halbleiter Lithografie, so entspricht der damalige Stein, dem heutigen Silizium-Wafer und die drauf realisierbaren Strukturen entstehen mittels eines lichtsensitiven Polymers, dem sogenannten Photoresist.

Das Grundprinzip der lithografischen Verfahren beruht darauf, mittels Teilchen- (Ionen, Elektronen) oder Photonenbestrahlung lokal die chemische Zusammensetzung des Photoresistes

zu ändern, um eine Struktur zu definieren [137]. Durch die Absorption der einfallenden Strahlung entsteht ein latentes Bild im Photoresist. In einem weiteren Prozessschritt kann dann der belichtete Photoresist (Positivlack) oder die unbelichteten Strukturen (Negativlack) selektiv entfernt werden. Aus dem latenten Bild entsteht so eine dreidimensionale Struktur im Photoresist. Nach einem optionalen Aushärten des Photoresistes ist der eigentliche lithografische Vorgang abgeschlossen. Ein Schema eines lithografischen Beispielprozesses ist in Abb. 3 dargestellt.

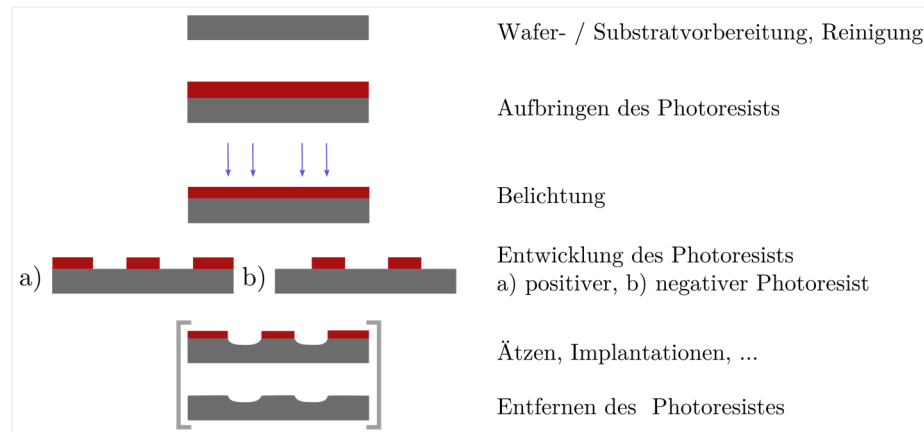


Abbildung 3: Die Lithografie besteht aus vier Grundschritten, die dann z.B. durch Ätzen, Implantationen oder Ähnliches erweitert werden. Vor und/oder nach dem Belichtungsvorgang, sowie nach dem Entwickeln wird Photoresist optional getempert.

Im Allgemeinen besteht der Herstellungsprozess für komplexe Bauteile aus vielen einzelnen Schritten, die zum Teil mehrfach in definierter Reihenfolge wiederholt werden. Jeder einzelne Schritt muss sehr präzise und akkurat ausgeführt werden, wofür zum Teil komplexe und teure Anlagen zum Einsatz kommen. Da die meiste Mikrooptik flach ist, können die Technologien, die ursprünglich für die Halbleiterfertigung konzipiert wurden, ebenfalls genutzt werden. Neben der Verwendung von Silizium-Wafern spielt vor allem der Einsatz verschiedener Gläser, wie auch von Polymeren und anderen Dielektrika eine wichtige Rolle in der Herstellung mikrooptischer Elemente.

Der Belichtungsvorgang, der die latente Struktur in Resist definiert, kann auf zwei unterschiedliche Weisen erfolgen. Man unterscheidet zwischen seriellen oder parallelen Belichtungen. Serielle Verfahren sind gleichzeitig direktschreibende Verfahren, die den Photoresist sequentiell belichten. Dazu zählen Verfahren wie die Elektronen- oder Ionenstrahlolithografie (engl. Electron-/ Focused-ion beam lithography, EBL/FIB), sowie das Laserstrahlschreiben. Direktschreibende Verfahren erlauben eine sehr flexible Definition der Strukturen, wobei der Zeitaufwand der Belichtung mit der Größe der Fläche skaliert. Im Vergleich dazu erzeugen parallele Verfahren, wie die Interferenz- oder Maskenlithografie, eine gleichzeitige Modifikation des Photoresistes auf einer größeren Fläche.

In der Halbleiterfertigung werden typischerweise binäre Strukturen benötigt und gefertigt. Dafür wird ein Photoresist mit möglichst hohem Kontrast benötigt (Abb. 4 (a)). Nur so können höchste Auflösungen erreicht werden. Für die Mikrooptik hat allerdings die Erzeugung kontinuierlicher Strukturen ebenfalls eine hohe Bedeutung. Im Gegensatz zu binären Strukturen

wird für die Erzeugung kontinuierlicher Strukturen ein Photoresist mit schwachen Kontrast, idealerweise mit einer linearen Abhängigkeit der Entwicklungsrate von der eingebrachten Lichtdosis, benötigt (s. Abb. 4 (b)). In Kapitel 4.1 werden verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung kontinuierlicher Strukturen aufgezeigt.

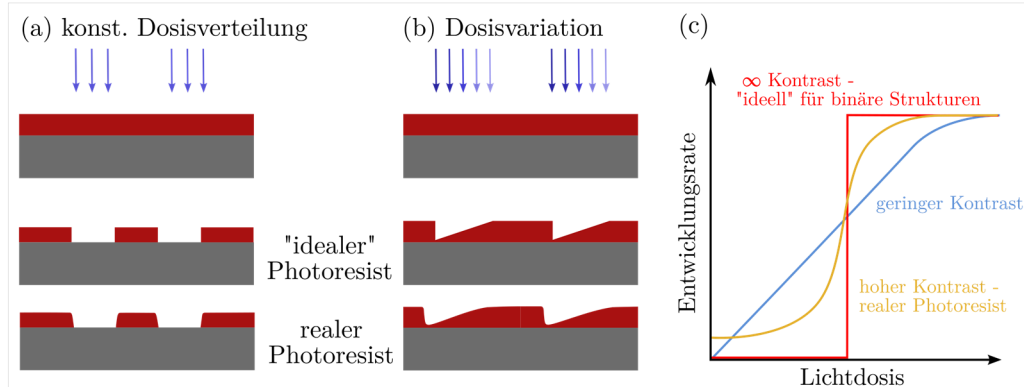


Abbildung 4: Erzeugung (a) binärer Strukturen mittels Photoresist mit hohem Kontrast und (b) kontinuierlicher Strukturen unter Verwendung eines Photoresist mit geringen Kontrast. (c) Schematische Darstellung des Zusammenhangs der erreichbaren Entwicklungsrate abhängig von der Belichtungsdosis [137].

Vor allem für die Fertigung mikrooptischer Elemente bieten lithografische Belichtungsverfahren eine sehr hohe Flexibilität, um eine Vielzahl an Strukturgeometrien realisieren zu können. Welche Verfahren und Methoden sich am besten eignen, muss immer für das entsprechende Element und die Applikation individuell geprüft werden.

2.1.2.1 Direktschreibende lithografische Herstellung

Flexible, direktschreibende Verfahren, wie die Elektronenstrahlolithografie oder das Laserstrahlschreiben sind zwei bedeutende Herstellungsverfahren, die vor allem für die Fertigung einzelner kundenspezifischer Elemente oder kleinerer Stückzahlen eingesetzt werden, z.B. wenn die Herstellung einer Photomaske wirtschaftlich unrentabel ist oder als Masterstruktur zur Abformung.

Die Elektronenstrahlolithografie

Die Elektronenstrahlolithografie nutzt einen fokussierten, elektromagnetisch und elektrostatisch ablenkbaren Elektronenstrahl, um ein latentes Bild in einem elektronenempfindlichen Material, dem Resist, zu definieren. Der Elektronenstrahl besitzt in der Regel eine gaußförmige Intensitätsverteilung oder kann mit Hilfe von Blenden variabel geformt (engl. Variable shaped beam, VSB) werden [4, 46, 138, 139].

Die Elektronenstrahlolithografie ermöglicht eine Herstellung von hoch aufgelösten Strukturen von nur wenigen Nanometern lateraler Abmessung [140, 141]. Das serielle Schreibregime macht es zu einem sehr flexiblen Verfahren hinsichtlich möglicher Strukturgeometrien. Neben binären Strukturen, ist die Herstellung kontinuierlicher Strukturen mittels variierteter Dosisverteilung ebenfalls möglich [4].

Die Kombination aus hoher Auflösung und serieller Strukturierung kann sehr lange Schreibzeiten bedeuten. Somit werden großflächige Elemente und/oder hoch aufgelöste und dicht gepackte Strukturen sehr teuer in ihrer Fertigung. In den letzten Jahren wurde die Elektronenstrahlolithografie mit Hinblick auf Verringerung der Schreibzeiten weiterentwickelt. Belichtungstechniken wie die Nutzung eines variabel geformten Strahls (VSB), die Verwendung von Charakter-Projektion (engl. Character-projection, CP) oder der Einsatz mehrerer Elektronenstrahlen ermöglichen eine Reduzierung der Schreibzeiten, abhängig von der Struktur, um mehrere Größenordnungen [142 - 146].

Die Elektronenstrahlolithografie eignet sich vor allem zur Fertigung von Spezialelementen mit einer hohen Auflösung z.B. für die Astronomie [147] oder für Werkzeuge für die Massenproduktion mit anderen Lithografieverfahren (Abformwerkzeuge, Photomasken), sowie zum Einsatz in der Grundlagenforschung. Typischerweise erfolgt die Strukturierung planer Substrate und Elemente. Die Herstellung bzw. Strukturierung gekrümmter Elemente bedeutet meist aufwändige, maßgeschneiderte Anlagentechnologien.

Im Rahmen dieser Arbeit spielt die Elektronenstrahlolithografie für die Herstellung hoch aufgelöster und komplexer Photomasken für die Verwendung in der Mask Aligner Lithografie eine sehr bedeutende Rolle. In Kapitel 4 werden unterschiedliche Photomasken und deren Applikation vorgestellt, deren hoch aufgelöste Strukturierungen mittels Elektronenstrahlolithografie realisiert wurden.

Das Laserstrahlschreiben

Ein weiteres direktschreibendes Verfahren ist das Laserstrahlschreiben [40, 49]. Mittels einer fokussierten Laserquelle oder alternativ Leuchtdioden (engl. Light-emitting diode, LED), wird ein latentes Bild in Photoresist erzeugt. Ein Laserschreiber ist im Vergleich zu einem Elektronenstrahlschreiber weniger kostenintensiv in der Anschaffung, da die Anlagentechnologie weniger komplex und somit in der Handhabung einfacher ist (s. Anhang 2, Tab. 1).

Die realisierbaren Elemente und Strukturen sind beschränkt durch eine minimale Auflösung von typischerweise 0,5 - 1 μm . Gleichzeitig ergeben sich, ähnlich wie bei der Elektronenstrahlolithografie, lange Schreibzeiten durch die sequentielle Belichtung. Die sequentielle Belichtung erlaubt aber von der Schreibposition abhängige Intensitätsmodulation des Laserstrahls und somit eine einfache Fertigung kontinuierlicher Oberflächenformen und die Strukturierung auf schwach gekrümmten Oberflächen [4, 148 - 150].

Das Laserstrahlschreiben bietet damit eine kostengünstigere Alternative zur Elektronenstrahlolithografie für Anwendungen mit moderater Auflösung und geringen Stückzahlen. Oft findet es Anwendung zur Herstellung von Diffusoren, Linsen oder diffraktiver optischer Elemente (engl. Diffractive optical elements, DOEs), sowie von Bragg-Gittern [149, 151]. Darüber hinaus wird das Laserstrahlschreiben genutzt für einfaches Prototyping und zur Originalherstellung z.B. von Gussformen für das Mikro-Spritzguss Verfahren.

2.1.2.2 Maskenbasierende lithografische Herstellung

Der Einsatz von Masken für die lithografische Bearbeitung erlaubt eine parallele Strukturierung des Photoresistes auf lateral ausgedehnten Flächen. Maskenbasierte Lithografie erlaubt somit meist eine effiziente Bearbeitung großer Stückzahlen oder großflächiger Elemente. Im Allgemeinen beinhaltet die Maske Strukturinformationen, die auf ein Substrat übertragen werden sollen. Dabei werden verschiedene Maskentypen auf unterschiedliche Art und Weise verwendet.

(Nano-)präge- und Softlithografie

Das Prinzip der *Prägelithografie* (engl. Imprintlithography, Hot/UV Embossing) beruht darauf, einen Abdruck mit Hilfe eines Prägestempels im Polymer zu erzeugen. Im Fall der *Präge-* und *Softlithografie* ist der Stempel im übertragenen Sinn die Maske. Bei der Nanoprägelithografie werden die Strukturen des Formwerkzeuges abgeformt, indem der Prägestempel in eine Polymerschicht hineingedrückt wird. Man unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Technologien: das thermische Heißprägen oder die Aushärtung eines flüssigen Polymers mit Hilfe von UV-Strahlung [4, 61, 65, 152, 153]. Das Heizen und Abkühlen, sowie der angewendete Prägedruck bedeuten Stress für das Abformwerkzeug und beschränken dessen Lebensdauer maßgeblich. Die Originalstruktur, auch als Master bezeichnet, wird meist mittels Laserstrahlschreiber, Photo- oder Elektronenstrahlolithografie hergestellt. Dieser wird dann verwendet, um Kopien als Prägestempel herzustellen.

Die *Nanoprägelithografie* (engl. Nanoimprint Lithography, *NIL*), die oft als Replikationsverfahren genutzt wird, ist ein einfaches Verfahren, um kostengünstig große Stückzahlen z.B. mikrooptischer Elemente zu vervielfältigen. Es ist möglich sehr präzise Replikationen mit Strukturdimensionen kleiner 20 nm herzustellen [154, 155]. Darüber hinaus werden auch geprägte Strukturen als Maske für nachfolgenden Prozesse wie Ätzen, oder Ionenaustausch verwendet.

Ein ähnliches Verfahren ist die *Softlithografie* [67, 156] und wird oft auch als micro-contact printing (μ CP) bezeichnet. Die eigentliche Maske, deren Strukturen übertragen bzw. vervielfältigt werden sollen, ist auch hier eine Art Stempel. Ein oft für den Stempel verwendetes Material ist das flexible Elastomer PDMS (Polydimethylsiloxan). Das Verfahren ähnelt dem Benutzen eines Stempels im Büro. Material, welches sich auf dem Relief des Stempels befindet, kann durch den (soften) Kontakt des Stempels mit einem Substrat übertragen werden. Damit ist es möglich, Strukturen auch konform auf flexible oder gekrümmte Substrate zu übertragen [68].

Für die Herstellung des PDMS Stempels wird zunächst eine Originalstruktur, z.B. aus Silizium, benötigt. Abhängig von der benötigten Auflösung, wird diese ebenfalls meist mittels Elektronenstrahl- oder Photolithografie in Kombination mit Ätzverfahren hergestellt. Diese oft teure, z.T. hoch aufgelöste Originalstruktur, wird dann genutzt, um davon den PDMS Stempel zu reproduzieren, welcher dann zur kostengünstigen Vervielfältigung der Strukturen genutzt wird. Neben dem Einsatz für die Softlithografie, findet der PDMS-Stempel häufig auch

Anwendung für UV-Abformungen. Mit dem Verfahren der Softlithografie ist es möglich hoch aufgelöste Strukturen kleiner 50 nm herzustellen bzw. zu vervielfältigen [157].

Die finale Auflösung der Prägeverfahren ist im Allgemeinen abhängig von der Qualität der Originalstruktur. Für Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen sind beide Prägeverfahren nicht geeignet. Die Softlithografie, sowie die Nanoprägelithografie werden kommerziell für die Replikation vor allem großflächiger Elemente eingesetzt. Bei beiden Verfahren handelt es sich um relativ einfache Technologien, die allerdings auf anderen lithografischen Verfahren aufbauen, wie für die Originalherstellung des Stempels. Einen Überblick über die verschiedenen Prägeprozesse und Beispielapplikationen geben u. a. Glinsner et al. [66] oder Schiff et al. in [153]. Die Technologien der Prägelithografie sind kommerziell weit verbreitet [158, 159], so z.B. für großflächige Oberflächenstrukturierungen von Farbfiltern [160], Nanosensoren [161] oder auch Mikrolinsenarrays [162].

Maskenbasierte Photolithografie

Der Ursprung der maskenbasierten Photolithografie geht zurück auf die Anfänge der Halbleiterfertigung. Von anfänglich 100 μm großen Strukturen werden heute Dimensionen von 20 - 30 nm in der industriellen Halbleiterfertigung realisiert [69]. Dies ermöglicht die Integration vieler Elemente, sowie eine kompakte Bauweise und somit die Realisierung unserer heutigen schnellen und großen digitalen Speicher, sowie leistungsfähiger Prozessoren.

Das Hauptaugenmerk der Halbleiterindustrie liegt auf der Herstellung immer kleiner werdender Strukturen in sehr großen Stückzahlen. Die dafür notwendige Technologie, die *Projektionslithografie* [163], umfasst die mit am besten entwickelten, hochauflösenden und akkuraten optischen Systeme [164], deren Entwicklung maßgeblich von „Moore’s Law“ [165] geleitet wurde und wird [62]. Die Verwendung dieser hoch entwickelten Technologie bedeutet für Unternehmen hohe Investitionskosten. Aus diesen Grund besteht ein ständiges Bestreben, solche komplexen technologischen Systeme zu vermeiden, wenn nur moderate Auflösungen benötigt werden. Eine kosteneffiziente Alternative stellt der Mask Aligner dar (s. Anhang 2, Tab. 1).

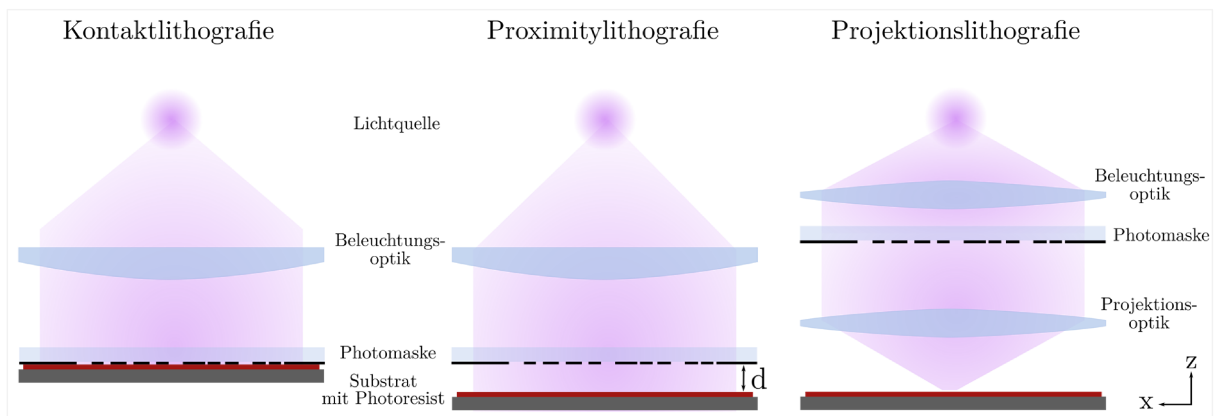


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung verschiedener Belichtungs- und Projektionstechniken der Photolithografie

Die Projektionslithografie nutzt hoch entwickelte Objektive, um die Strukturinformationen der Photomaske verkleinert (typischerweise 5:1, oder 4:1) auf das mit Photoresist beschichtete Substrat zu übertragen. Dabei wird zunächst ein kleiner Teil des Wafers belichtet, wie in Abb. 5

dargestellt, und mittels Verschiebung und Belichtungswiederholungen der komplette Wafer gefüllt [6, 40].

Verzichtet man auf die kostenintensiven und komplexen Optiken ergibt sich das Prinzip der Mask Aligner Lithografie [6, 166], auch bezeichnet als Schattenwurf Lithografie. Dabei werden die Strukturen der Photomaske im Maßstab 1:1 auf das mit Photoresist beschichtete Substrat übertragen (s. Abb. 5). Die dabei realisierbaren Strukturgrößen sind durch Beugung des Lichtes an den Maskenstrukturen begrenzt. Eine hohe Auflösung kann nur erreicht werden, wenn sich Photomaske und Substrat in Kontakt befinden, wobei die realisierbaren Strukturgrößen in der Größenordnung der verwendeten Wellenlänge möglich sind [167]. So genannte Kontaktbelichtungen bedeuten allerdings Belastungen für Maske sowie Substrat. Dies kann zu Verunreinigungen der Photomaske und letztendlich zur Kontamination führen. Regelmäßiges Reinigen der Photomaske kann zusätzlich Qualitätsverluste der Maskenstruktur bedeuten.

Belichtungen, bei denen Substrat und Photomaske durch einen Abstand voneinander getrennt sind, sogenannte Proximity-Belichtungen, bewahren die Qualität und erhöhen die Lebensdauer der Photomaske. Allerdings ist die hinter der Maske entstehende Lichtverteilung stärker von Beugung beeinflusst und limitiert die erreichbare Auflösung mit größer werdendem Abstand zunehmend. Strukturgrößen kleiner $2\text{ }\mu\text{m}$ sind mit konventionellen „Proximity“ Belichtungen und typisch genutzten Abständen von $10 - 25\text{ }\mu\text{m}$ nicht realisierbar [40]. Die Abhängigkeiten der erreichbaren Strukturdimensionen von Abstand und Wellenlänge werden in Kapitel 3.3 noch einmal genauer betrachtet.

Für viele Anwendungen, z.B. die der LED Produktion oder die Herstellung von Mikrooptiken und MEMS, ist diese Auflösung ausreichend. Die Herstellung dieser Strukturen profitiert von einer einfachen technologischen Handhabung sowie hoher (Kosten-)Effizienz, die durch die parallele Belichtung erreicht wird. Die Investitionskosten eines Mask Aligners sind im Vergleich zu anderen etablierten hochauflösenden Herstellungsverfahren moderat und erlaubt somit sowohl Unternehmen als auch Instituten und Bildungseinrichtung die Anschaffung dieser Technologie. Moderne Weiterentwicklungen der Mask Aligner Technologie in Kombination mit verschiedenen auflösungssteigernden Techniken ermöglichen heute hochauflösende Strukturierungen mit lateralen Strukturgrößen $<100\text{ nm}$ [9, 10]. Das Spektrum mikrooptischer Elemente, die mittels Mask Aligner hergestellt werden können, wird dadurch ebenfalls vielseitiger. Dennoch ist die Flexibilität durch die Verwendung einer Photomaske im Vergleich zu direktschreibenden Verfahren geringer. Wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt wird, bietet die Photomaske für die Photolithografie Freiheitsgrade, die z.B. zur Auflösungssteigerung [168] oder für die Herstellung kontinuierlicher Oberflächenprofile [169] genutzt werden können.

2.1.2.3 Interferenzlithografie

Die Interferenzlithografie (kurz IFL), auch holografische Strukturierung genannt, ist eine speziell für die Herstellung periodischer Oberflächenstrukturen entwickelte Technologie [40, 105, 170]. Sie wird genutzt, um Gitter, eines der wichtigsten Elemente in vielen modernen optischen Systemen, zu realisieren. Die IFL nutzt die Intensitätsverteilung der Region, in der die Überlagerung zweier oder mehrerer kohärenter Lichtwellen ein periodisches Interferenzmuster erzeugt. Die minimal erreichbare Auflösung wird durch die verwendete Wellenlänge λ der Laserquelle begrenzt und ergibt sich bei einer Zweistrahlinterferenz mit $\lambda/2$. Die Periode p des erzeugbaren Gitters ist durch die verwendete Wellenlänge und den Winkel ϕ , unter dem die zwei Strahlen überlagert werden, eindeutig bestimmbar entsprechend

$$p = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin\phi} . \quad 2.1$$

Verschiedene Methoden und Belichtungstechniken der IFL erlauben die Erzeugung hoch aufgelöster periodischer Strukturen, wie z.B. binärer (lamellen-), sinusförmiger Profile, oder von Blazestrukturen, im Allgemeinen auf planaren, aber auch auf konkaven oder konvexen Substraten, wie auch auf Freiformflächen. So sind auch Belichtungen von steilen asphärischen Substraten möglich, die mittels Ritzen nicht strukturierbar wären [34, 171].

Das parallele Belichtungsregime ermöglicht die Strukturierung auch großer Substrate (Durchmesser: 10-1200 mm) in relativ kurzer Zeit [172]. Die Investitionskosten der benötigten Technologien sind u.a. abhängig von den Anforderungen des zu fertigenden Elementes. Dabei können die Kosten stark variieren [173]. Für hohe Genauigkeiten können die Investitionskosten mit denen direkterschreibender Verfahren verglichen werden (s. Anhang 2, Tab. 1).

Spektrometergitter sind ein typisches Beispiel für Gitter, die oft mittels IFL hergestellt werden, aber auch geritzt werden könnten. Die mit IFL hergestellten Gitter besitzen die Vorteile geringerer Lichtstreuung und Gittergeister*, da weder statistische Positionsfehler der Gräben noch periodische Positionsabweichungen entstehen [34, 105, 174].

Mittels IFL hergestellte Blazegitter haben allerdings den Nachteil verrundeter Kanten. Während Facettenwinkel der mittels IFL hergestellten Gitter auf gekrümmten Substraten kontinuierlich variieren, sind die der mechanisch geritzten Gitter alle parallel, da eine permanente Korrektur des Diamantwerkzeuges erfolgen kann [34, 105].

* Gittergeister sind zusätzliche und ungewünschte Beugungsmaxima. Diese entstehen, wenn eine periodische Störung über die Fläche des Gitters vorliegt.

3 Mask Aligner Lithografie

3.1 Einsatzgebiete

Der Mask Aligner war einst das wichtigste Arbeitsgerät der Halbleiterindustrie, um die ersten Schaltkreise zu realisieren. Als die Dimensionen der Halbleiterbahnen immer kleiner wurden, konnte die Technologie des Mask Aligners die Anforderungen an die erreichbare Auflösung nicht mehr erfüllen. Die Projektionslithografie wurde entwickelt und der Einsatz des Mask Aligners schrumpfte. Führende Spitzentechnologie heutiger immersionsbasierter Lithografie-Stepper ermöglicht Strukturgrößen kleiner als 25 nm auf Substraten mit 300 Millimeter Durchmesser als Massenproduktion [69, 70, 175].

Die maskenbasierten Verfahren der Projektionslithografie wurden auf die Anforderungen der Halbleiterfabrikation optimiert und sind für die Fertigung mikrooptischer Elemente weitestgehend ungeeignet. Anders als für die Halbleiterindustrie müssen z.B. dicke Photoresistschichten prozessiert werden, wofür u.a. eine hohe Schärfentiefe notwendig ist. Darüber hinaus müssen auch große sowie dicke Substrate und Flächen verarbeitet und strukturiert werden. Hinsichtlich der lateralen Auflösung von mikrooptischen Strukturen ist die Anforderung an den lithografischen Prozess in vielen Fällen etwas entspannter als für die Halbleiterstrukturen. Aufgrund dessen eignen sich hierfür die maskenbasierten Verfahren der Mask Aligner Lithografie als eine sehr gut entwickelte Alternative zur Projektionslithografie.

Eine schnelle Belichtung sowie die gute Reproduzierbarkeit aufgrund der definierten Strukturvorgaben in der Photomaske sind ebenfalls beste Voraussetzungen für die Herstellung großer Stückzahlen. Die hohen Investitionskosten der Photomaske rentieren sich durch eine zahlenmäßig hohe Vervielfältigung der Strukturen. Die Mask Aligner Lithografie erlaubt also das Prozessieren großer Stückzahlen auf Wafer-Level Basis, aber immer mit dem Kompromiss eingeschränkter Auflösung. Ein hochautomatisierter Mask Aligner der Firma SUSS MicroTec „MA300 GEN2“ erreicht beispielsweise eine Auflösung von ca. 3,5 μm im „Proximity-Modus“ zur Belichtung von 300 mm großen Wafern [176]. Eine genaue Betrachtung der Auflösungslimitation folgt in Kapitel 3.3.

Das Spektrum von Mikrooptiken, für die eine Wafer-basierte Herstellung möglich ist, ist groß. Dazu zählen Elemente z.B. für Laser und/oder faserbasierte Technologien (z.B. Einkoppeloptiken, Strahlformung, Pulskompressoren) sowie für heutige Mobiltelefone (z.B. für Kamera, Bewegungssensoren, Blitzlichtoptik) oder auch für medizinische Geräte (z.B. Endoskope), u.v.m. [4, 7, 177 - 179]. Der Mask Aligner ist aber nicht allein ein wichtiges Werkzeug zur Herstellung mikrooptischer Strukturen, sondern auch Werkzeug für CMOS* oder MEMS bzw. MOEMS Technologien [7, 8]. Auch für die sogenannten „Backend-Prozesse“ der Halbleiterindustrie ist die Mask Aligner Lithografie fester Bestandteil der Prozesskette. Dazu

* CMOS (Complementary Metal-Oxid Semiconductor) Technologie [303] beschreibt einen Herstellungsprozess für Halbleiterelemente. Diese Technologie findet z.B. Anwendung zur Herstellung von Speicherelementen, Mikroprozessoren und Sensoren.

zählen beispielsweise die Herstellung von Durchkontaktierungen (engl. Through-Silicon-Via, *TSV*) oder Abstandshaltern (engl. Bumping), Sägemarkierungen sowie Umverdrahtungen (engl. Backside redistribution layer, *RDL*) [180].

Um immer mehr Strukturen verschiedenster Anwendungen realisieren zu können, muss zum einen die limitierte Auflösung des Schattenwurfprinzips überwunden und zum anderen neue Techniken und Methoden entwickelt werden, um flexibel auf variable Strukturgeometrien reagieren zu können. Diese Aufgabe steht im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit.

Dieses Kapitel gibt einen zusammenfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Technik der Mask Aligner Lithografie. Neben der Funktionsweise eines Mask Aligners werden wichtige Methoden präsentiert, die es ermöglichen, die erreichbare Auflösung zu verbessern. In den anschließenden Kapitel 4 und 5 werden weitere Techniken vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, um vielfältige Strukturen kosteneffizient mittels Mask Aligner herzustellen und somit dessen Anwendungsspektrum zu erweitern. Dabei steht in den folgenden Kapiteln die Primärstrukturherzeugung in Photoresist im Mittelpunkt der Betrachtungen. Für die finale Struktur sind nachfolgende Prozesse wie ein Proportionaltransfer mittels geeigneter Ätztechnik oder Abformungen notwendig. Diese sind komplexe Vorgänge, die separat analysiert und optimiert werden müssen, was im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgt ist.

3.2 Erweiterung der Einsatzgebiete

Die Übersicht in Abb. 6 zeigt eine Auswahl jüngster Forschungsergebnisse der Mask Aligner Lithografie basierend auf der Anwendung des „Proximity-Modus“, d.h. der Nutzung eines definierten Abstands zwischen Photomaske und Substrat bei der Belichtung. Eine genaue Beschreibung der Funktionsweise folgt im nächsten Kapitel 3.3.

Ergebnisse die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, wurden in **oranger** Schrift hervorgehoben.

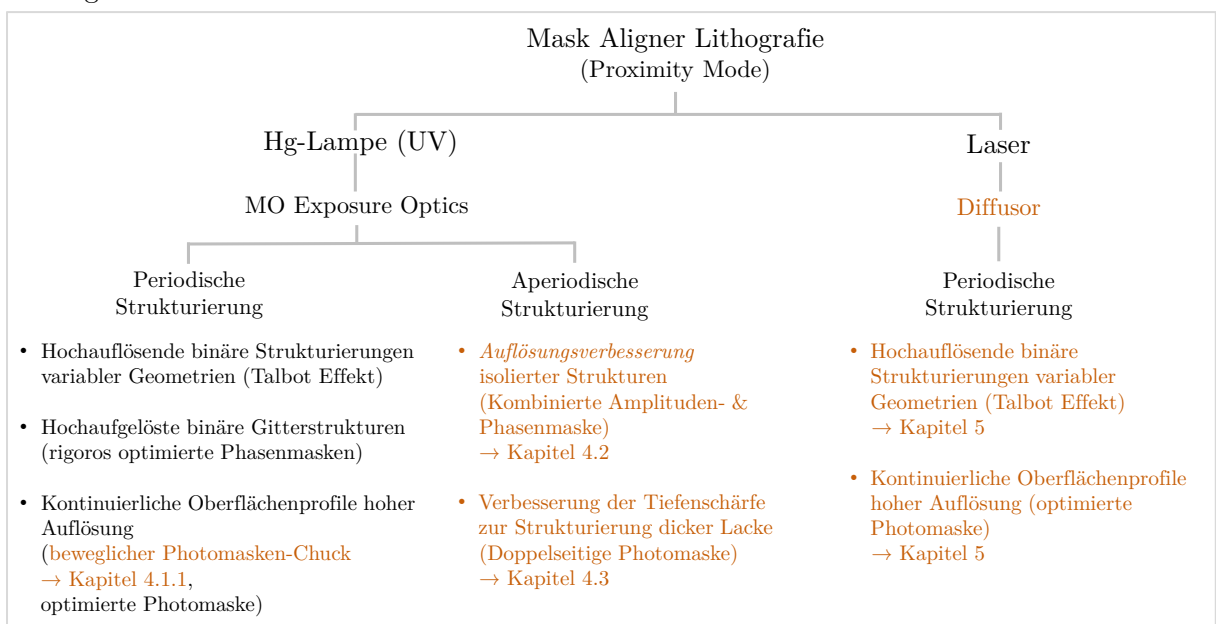


Abbildung 6: Angewandte Forschung auf dem Gebiet der Mask Aligner Lithografie. Unterschiedliche Methoden ermöglichen ein breites Spektrum an Strukturgeometrien.

Mit Einführung einer optimierten Beleuchtungsoptik, der sogenannten „MO Exposure Optics“ [181] (Kapitel 3.3.1), unter Verwendung einer Quecksilberdampflampe als Beleuchtungsquelle konnten verschiedene Methoden entwickelt werden, periodisch hoch aufgelöste Strukturen mittels Mask Aligner zu realisieren. Zum einen konnte dies wesentlich mit der Anwendung des Talbot Effektes (Kapitel 3.4.3) und zum anderen mittels rigoros optimierter Phasenmasken (Kapitel 3.4.2) gelingen. Aber auch die Strukturierung periodischer, kontinuierlicher Oberflächenprofile, wie z.B. Blazestrukturen, wurde weiterentwickelt.

Mit aufwändigen Designalgorithmen und komplexen mehrstufigen Photomaskenmodellen können optimierte Photoresistprofile erzeugt werden. Aber auch mittels einer einfacheren Technologie, einer lateral beweglichen und binären Photomaske können kontinuierliche Profile, wie das eines Blazeprofiles, erzeugt werden (Kapitel 4.1.1). Dieser bewegliche Photomaskenhalter bietet eine neue Flexibilität für bestehende Mask Aligner Systeme.

Neben streng periodischen (binären) Strukturen sind aber auch nicht-periodische Elemente von hohem Interesse. Unter Verwendung verschiedener Freiheitsgrade des Photomaskendesigns ist es im Rahmen der Arbeit gelungen, die Auflösung nicht-periodischer Strukturen mittels optimiertem Photomaskendesign zu verbessern (Kapitel 4.2). Darüber hinaus verhalf das Design einer doppelseitig strukturierten Photomaske zu einer verbesserten Schärfentiefe, z. B. zur Strukturierung dicker Photolacke (Kapitel 4.3.).

Neben der Photomaske, hat die Beleuchtung einen entscheidenden Einfluss auf das lithografische Ergebnis. Die Belichtung mittels Quecksilberdampflampe stößt für gewisse Anwendungen an ihre Grenzen. Eine Alternative bietet die Verwendung eines Lasers als Belichtungsquelle (Kapitel 5). Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür eine neue Beleuchtungsoptik realisiert. Der Einsatz eines Lasers als Belichtungsquelle ermöglicht verbesserte Belichtungszeiten sowie eine flexible, individuelle Wahl der Beleuchtungswinkel. Verschiedene experimentelle Ergebnisse bestätigen den Erfolg der Integration des Lasers als Beleuchtungsquelle in den bestehenden Mask Aligner Aufbau.

3.3 Funktionsweise des Mask Aligners

Das Grundprinzip der Mask Aligner Lithografie beruht auf dem Schattenwurf [4]. Strukturen einer Photomaske werden im Maßstab 1:1 auf ein mit lichtsensitivem Material beschichtetes Substrat übertragen. Dabei befinden sich Photomaske und Substrat in Kontakt oder separiert in einem gewissen Abstand, definiert als „proximity gap“. Die Belichtung erfolgt typischerweise mit UV-Licht.

Der technische Aufbau ist, vor allem im Vergleich zur Projektionslithografie, relativ einfach. Zwischen Photomaske und Substrat befinden sich keine weiteren (abbildenden) Optiken. Während einer Belichtung wird eine vollflächige Strukturübertragung der kompletten Photomaske realisiert, was die Herstellung von hohen Stückzahlen oder großer Elemente ohne mehrfaches Aneinandersetzen gleicher Felder (engl. Stitching) erlaubt.

Die Photomaske besteht typischerweise aus transmittierenden und absorbierenden Bereichen, wodurch Bereiche des Photoresistes auf dem darunter befindenden Substrat selektiv belichtet

werden. Eine schematische Anordnung der wichtigsten Elemente für die Umsetzung der Schattenwurf Lithografie zeigt die Abb. 7 (a).

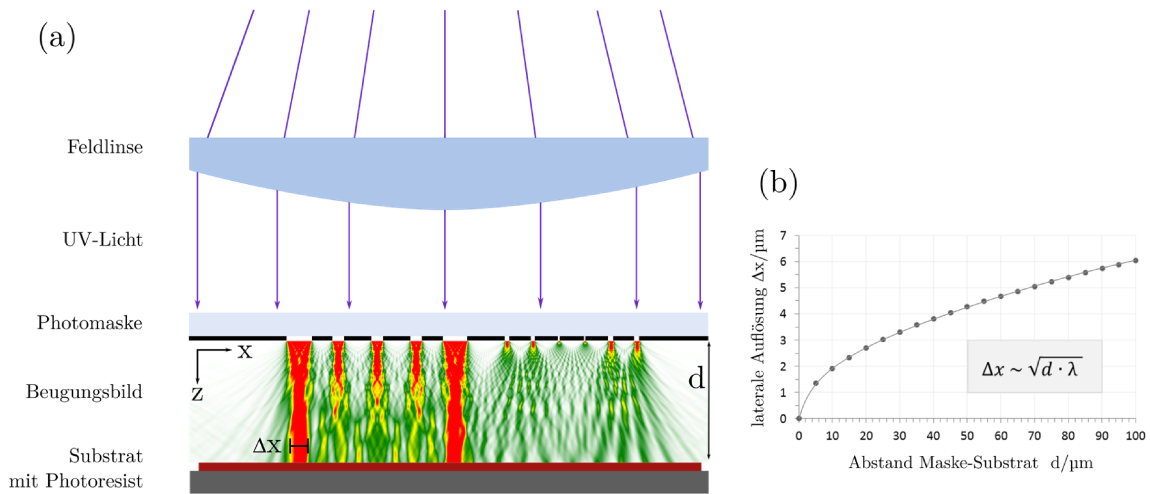


Abbildung 7: (a) Konzeptionelle Funktionsweise der Schattenwurf-Lithografie: Strukturen werden im Maßstab 1:1 von der Fotomaske auf das Substrat übertragen. Die dabei erreichbare Auflösung ist limitiert durch Beugungs- und Interferenzeffekte hinter der Photomaske. Umso kleiner der Abstand zwischen Maske und Substrat, umso höhere laterale Auflösungen können erreicht werden, wie beispielsweise für eine Belichtungswellenlänge von $\lambda = 365 \text{ nm}$ in (b) dargestellt.

Für die Belichtung gibt es zwei wesentliche Konzepte: Kontakt- und Proximitylithografie. Die Kontaktlithografie erlaubt eine hohe Auflösung. Die Dimensionen der realisierbaren Strukturen liegen im Bereich der verwendeten Wellenlänge der Beleuchtung [167]. Der mechanische Kontakt kann zum einen durch evakuieren des Abstandes zwischen Maske und Substrat (Vakuumkontakt) oder durch verschiedene Anpressdrücke (Hard- oder Soft-Kontakt) erzielt werden.

(Schmutz-) Partikel zwischen Maske und Substrat können zum einen zu einer verminderten Strukturqualität hinsichtlich Homogenität und Auflösung führen. Zum anderen führt der ständige Kontakt von Photomaske und Resist zur Verunreinigung der Maske selbst. Anhaftende Partikel verschlechtern die Belichtungsresultate, beschädigen die Chromschicht und erfordern kontinuierliche Reinigung der Photomaske, was wiederum zu Qualitätsverlusten führt.

Eine Verlängerung der Standzeit der Photomaske kann durch Nutzung eines definierten Abstands zwischen Maske und Substrat, wie in Abb. 7 (a) dargestellt, gewährleistet werden. Unter Berücksichtigung möglicher Inhomogenitäten von Substrat oder Photoresist ist ein minimaler Proximity-Abstand von $> 20 \mu\text{m}$ angemessen. Abhängig von den Maskenöffnungen entstehen unterschiedliche Schärfentiefen aufgrund der Nahfeldbeugung* hinter der Maske. Daraus resultiert, dass beispielsweise in einem Abstand $d = 20 \mu\text{m}$ Strukturgrößen $\Delta x < 3 \mu\text{m}$ ($\lambda = 365 \text{ nm}$) theoretisch nicht mehr adäquat von der Maske auf das Substrat übertragen

* Der Begriff Nahfeld in der Mask Aligner Lithografie (engl. Nearfieldholography) wurde von der Firma SUSS Microtec in Verbindung mit einem Gerät (MA6-NFH) und einer Patentanmeldung geprägt [195, 301]. Im Gegensatz zur eigentlichen Bedeutung des Begriffes, werden so Belichtungen mit sehr kleinen Abständen zwischen Photomaske und Substrat ($\Delta z \leq 500 \mu\text{m}$) bezeichnet. In der Optik beschreibt das Nahfeld den Bereich des evaneszenten Feldes hinter einer Apertur ($\Delta z \leq 50 \text{ nm}$).

werden können. Abhängig von Maske-Wafer-Abstand d sowie der Belichtungswellenlänge λ , kann man die minimal erreichbare Strukturgröße Δx mittels des Zusammenhangs

$$\Delta x \approx \sqrt{d \cdot \lambda} \quad (3.1)$$

abschätzen [6].

Der Zusammenhang zwischen Proximity-Abstand und lateraler Auflösung ist in Abb. 7 (b) noch einmal graphisch veranschaulicht. Mit steigendem Abstand von Maske und Substrat sinkt die mögliche Auflösung. Allerdings handelt es sich hier bei der kleinsten Auflösung nicht um das Prinzip des kleinst-möglichen Abstandes zur Trennung zweier Punkte nach Rayleigh [182], sondern um die minimal erreichbare Linienbreite. Diese realisierbare Auflösung limitiert jedoch das Spektrum an Strukturen, die mittels Schattenwurfprinzip hergestellt werden können.

Wenn auch Kontaktbelichtungen höhere Auflösungen erzielen, ist der Ertrag durch die Verunreinigungen und eingeschränkte Standzeit der Photomaske geringer als bei Proximity-Belichtungen. Letztere werden vor allem aus diesen genannten Gründen bevorzugt für die industrielle Fertigung genutzt.

Um die mit dem Proximity-Abstand einhergehende Auflösungsreduzierung zu kompensieren und zu verbessern, werden immer mehr Innovationen und Methoden entwickelt. Einige bedeutende werden im Kapitel 3.4 vorgestellt.

3.3.1 Das Beleuchtungssystem im Mask Aligner

Das Beleuchtungssystem eines Mask Aligners, wie es in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, setzt sich zusammen aus der Lichtquelle und dem optischen System, welches eine homogene Beleuchtung der Photomaske sicherstellt. Im letzten Jahrzehnt wurde die Beleuchtungsoptik des Mask Aligners bedeutend weiterentwickelt, um insbesondere eine kollimierte und telezentrische Beleuchtung der Photomaske zu gewährleisten [183].

Als Lichtquelle werden für die Mask Aligner Lithografie typischerweise leistungsstarke Hochdruck-Quecksilberdampflampen verwendet [184]. Quecksilberdampflampen emittieren ein breites Spektrum an ultravioletter Strahlung. Die prägnantesten Spektrallinien liegen bei 365 nm (i-Linie), 405 nm (h-Linie) und 436 nm (g-Linie). In den meisten Anwendungen der Mask Aligner Lithografie wird selektiv nur die intensive und kurzwellige i-Linie verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit basieren alle theoretischen Analysen sowie experimentellen Belichtungen unter Verwendung der Quecksilberdampflampe auf der Nutzung der i-Linie als Belichtungswellenlänge. Praktisch wird dies durch einen zusätzlichen Linienfilter im Strahlengang realisiert.

Durch die Positionierung der Quelle im Primärfokus eines Ellipsoidspiegels kann die Strahlung in einem sekundären Fokus des Spiegels gebündelt werden. Abhängig von der Länge der Bogenlampe und der Reflektorkonstruktion ergeben sich die Größe des sekundären Fokus und die Divergenz der Strahlung. Eine präzise Ausrichtung der Bogenlampe zum Reflektor ist folglich notwendig für einen optimalen Lichtleitwert, da dieser proportional zur beleuchteten Fläche und dem maximalen Beleuchtungswinkel ist [183]. Der Lichtleitwert, bzw. die Étendue E kann entsprechend der Gleichung

$$E = \iint \cos \alpha \cdot dA \cdot d\Omega \quad (3.2)$$

ermittelt werden [185]. Die Integration erfolgt dabei über das beleuchtete Flächenstück dA und den Raumwinkel $d\Omega$ unter Berücksichtigung des Winkels α , der Strahlungsrichtung, im Bezug zur Flächennormale des beleuchteten Flächenelementes.

Für eine homogene und kollimierte Beleuchtung der Photomaske bedarf es eines optischen Systems aus verschiedenen Linsen, wie beispielsweise in Abb. 8 dargestellt.

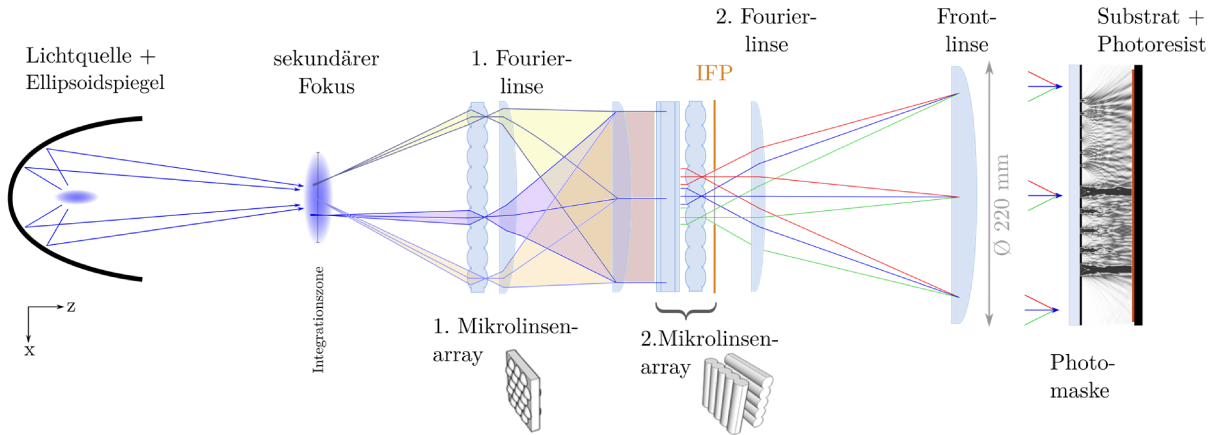


Abbildung 8: Schematischer Aufbau eines Beleuchtungssystems eines Mask Aligners der Firma SUSS MicroTec mit integrierter „MO Exposure Optics“ [183], die eine telezentrische und homogene Beleuchtung der Photomaske sicherstellt sowie eine selektive Wahl der Beleuchtungswinkel ermöglicht.

Die Abb. 8 zeigt ein Beleuchtungssystem eines Mask Aligners unter Verwendung einer Quecksilberdampfampe in Kombination mit zwei Mikrolinsenarrays zur Beleuchtungshomogenisierung. Dieser schematische Aufbau entspricht dem optischen System, wie es experimentell auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde. Dabei sind die Mikrolinsenarrays zentraler Bestandteil eines optimierten Mask Aligner Beleuchtungssystems und Grundlage der vorliegenden Arbeit, basierend auf der so genannten „MO Exposure Optics“ [181, 183].

Der Verwendung von sogenannten Wabenkondensoren liegt ein Ansatz zugrunde, der auf das Beleuchtungssystem von Mikroskopen [186] zurückzuführen ist. Das Konzept der so genannten Köhlerschen Beleuchtung beruht darauf, dass jeder Punkt der Lichtquelle die gesamte Maskenebene ausleuchtet, wie in Abb. 9 dargestellt.

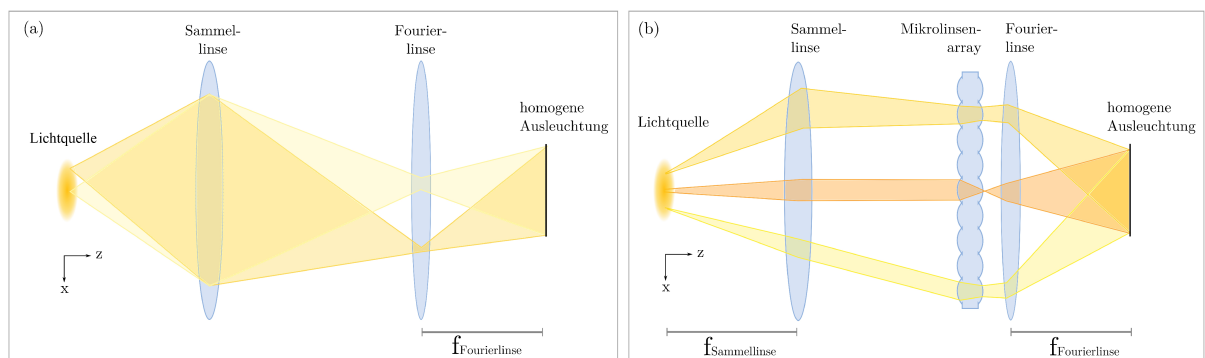


Abbildung 9: Schematischer Aufbau einer (a) klassischen Köhler Beleuchtung, sowie eines (b) Köhler Integrators.

Unter der Verwendung einer einzelnen Linse (Abb. 9 (a)) können sich Intensitätsschwankungen der Quelle auf die Photomaskenbeleuchtung übertragen. Die „Zerlegung“ einer einzelnen Linse in eine Vielzahl paralleler Köhlerscher Beleuchtungssysteme (Abb. 9 (b)) vermeidet dies und stellt zusätzlich sicher, dass der Winkelbereich jedes einzelnen Quellpunktes ebenfalls auf die komplette Photomaske übertragen wird. Somit wird neben einer homogenen Intensitätsverteilung auch eine homogene Winkelverteilung über die komplette Photomaske sichergestellt, unabhängig von Winkelinhomogenitäten der Quellemission.

In der Nähe des sekundären Brennpunktes des Lampenreflektors wird das erste Tandem-Mikrolinsenarray positioniert (s. Abb. 8). Die Teilstrahlen des Mikrolinsenarrays werden mit einer dahinter positionierten Einzellinse in deren Brennweite, homogen überlagert. Da die Überlagerung in der Fourierebene stattfindet, wird diese Linse auch als Fourierlinse bezeichnet. Eine zusätzliche Feldlinse vor dem zweiten Mikrolinsenarray stellte dessen kollimierte Beleuchtung sicher. Wird das Mikrolinsenarray allerdings unausgeglichen beleuchtet und keine weitere Optik würde folgen, ergäbe sich eine Inhomogenität der Beleuchtungswinkel der Photomaske. Um diesen Effekt zu mindern, wird ein zweites Tandem-Mikrolinsenarray in der Brennebene der ersten Fourierlinse positioniert. Somit können schließlich auch die Winkelinhomogenitäten der Photomaskenbeleuchtung minimiert werden.

Auf diese Weise ist es möglich, die Inhomogenität der Photomaskenbeleuchtung im Durchmesser von 200 mm auf bis zu 2-3% zu reduzieren, abhängig von der Qualität der Mikrolinsenarrays [9]. Eine abschließende, sogenannte Frontlinse im Strahlengang stellt eine telezentrische Beleuchtung der Photomaske sicher. Eine telezentrische Beleuchtung garantiert die maßhaltige 1:1 Übertragung der Strukturen von Photomaske auf das Substrat, ohne laterale Verschiebungen.

Auf Grundlage der optimierten Homogenisierung der Beleuchtung ist es möglich, mit dem hier beschriebenen Beleuchtungssystem Winkel der Photomaskenbeleuchtung selektiv zu wählen. Die Wahl des Winkelspektrums bedeutet einen einflussreichen Freiheitsgrad zur Definition der minimal realisierbaren Strukturen. Für die Selektion der Beleuchtungswinkel wird eine zusätzliche Blende, auch als IFP (engl. Illumination filter plate) bezeichnet, im Strahlengang hinter dem zweiten Mikrolinsenarray positioniert. Je kleiner die Öffnung, umso geringer das Spektrum der Beleuchtungswinkel, folglich desto geringer die Restdivergenz der Photomaskenbeleuchtung. Abbildung 10 zeigt das Prinzip der selektiven Bestimmung der Beleuchtungswinkel der Photomasken exemplarisch an drei verschiedenen Blenden (IFPs).

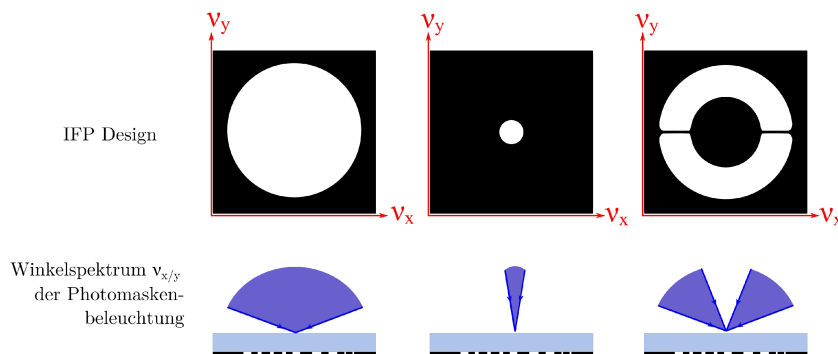


Abbildung 10: Bestimmung des Winkelspektrums der Photomaskenbeleuchtung mittels IFP.

Soll die Restdivergenz so klein wie möglich sein, muss die Blendenöffnung ebenfalls sehr klein gewählt werden. Ein Blendendurchmesser von z.B. 10 mm bedeutet für die Photomaskenbeleuchtung ein Winkelspektrum von $\pm 0,43^\circ$, welches sich aus den Brennweitenrelationen der Beleuchtungsoptik ergibt. Allerdings sind Durchmesser < 10 mm ineffizient, da aufgrund der geringen Transmission durch so kleinen Blenden sehr lange Belichtungszeiten entstehen. Die Bestrahlungsstärke auf der Photomaske korreliert mit der Blendenöffnung. Eine verbleibende Restdivergenz der Photomaskenbeleuchtung limitiert die Generierung von hoch aufgelösten Strukturen, wofür eine vollständige kollimierte Beleuchtung optimal wäre. Die Nutzung einer nicht vollständig kollimierten Photomaskenbeleuchtung hat dennoch mehrere Vorteile. Verschiedene Beleuchtungswinkel reduzieren die Auswirkungen von Beugungseffekten in der Proximity-Lithografie. Die Photomaske wird mit einem inkohärenten Winkelspektrum ebener Wellen beleuchtet, wobei die Wahl der Geometrie der Blende die Winkelanteile definiert.

Abbildung 11 veranschaulicht den Einfluss verschiedener Beleuchtungswinkel graphisch am Beispiel einer isolierten Photomaskenstruktur. Hierfür wurden Simulationen zwei verschiedener Belichtungsvarianten der Photomaske gegenübergestellt. Das hinter der Maske entstehende Luftbild ergibt sich aus der Faltung des Beugungsbildes der Photomaskenstruktur mit der Blendengeometrie, dem Winkelspektrum der Beleuchtung. Als Luftbild wird die Intensitätsverteilung des propagierenden Feldes hinter der Photomaske direkt vor der Absorption in Photoresist bezeichnet. Abbildung 11 (a) zeigt eine vollständige kollimierte Beleuchtung eines $5\text{ }\mu\text{m}$ breiten Spaltes einer Photomaske. Die Lichtausbreitung hinter der Photomaske wurde für den Abstandsbereich bis $50\text{ }\mu\text{m}$ in 50 nm Schritten simuliert. Dabei zeigt sich z.B. in einer Entfernung von $50\text{ }\mu\text{m}$ hinter der Photomaske ein charakteristisches Interferenzmuster, bestehend aus Intensitätsminima und -maxima (Abb. 11 (a)). Für die Photolithografie können solche „side lobes“, wie die symmetrischen Intensitätsmaxima höherer Ordnungen (≥ 1) genannt werden, störend sein und den Kontrast mindern.

Durch die Verwendung einer „off-axis“ Beleuchtung, ergibt sich in der Luftbildebene eine Überlagerung lateral verschobener Beugungsbilder der Photomaskenstruktur für die einzelnen Beleuchtungswinkel mit Bezug zur senkrechten Beleuchtung. Mit geeigneter Wahl des Winkelspektrums bzw. der Blendengeometrie können beugungsbedingte Effekte, wie Überschwüngen, reduziert und somit der Kontrast des Luftbildes verbessert werden, wie Beispiel (b) in Abb. 11 verdeutlicht. Hier zeigt sich nur noch das zentrale Maximum nullter Ordnung. Durch die Überlagerung der Beugungsbilder ergibt sich gleichzeitig ein Mittelungseffekt, der zu einer Verbesserung der Schärfentiefe gegenüber einer ausschließlich senkrechten Beleuchtung führt. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass mit der Verwendung eines Winkelspektrums zugleich eine Verringerung der erreichbaren Auflösung erfolgt, was sich in der Vergrößerung der Halbwertsbreite der Intensitätsverteilung in Abb. 11 (b) des Luftbildes widerspiegelt. Bei dieser Simulation wurde ein Winkelspektrum für x und y von $\pm 4,3^\circ$ verwendet.

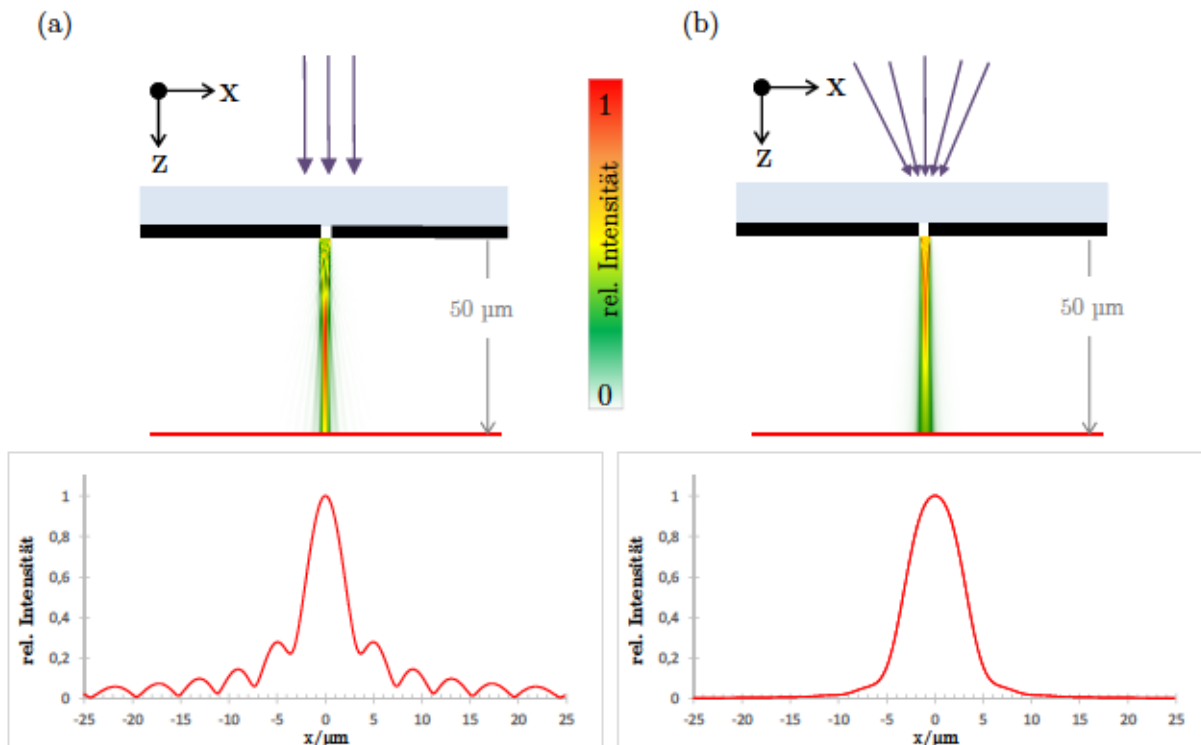


Abbildung 11: Einfluss des Beleuchtungsspektrums der Photomaske auf die Strukturübertragung für (a) vollständig kollimierte Beleuchtung unter 0° und (b) mit einem Winkelspektrum von $\pm 4,3^\circ$ unter Verwendung von monochromatischer, inkohärenter Beleuchtung.

3.3.2 Maske-Wafer-Ausrichtung

Nicht nur die Qualität des Beleuchtungssystems sondern auch eine präzise Orientierung von Photomaske zum Substrat ist eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung homogener, hoch aufgelöster Strukturen, ohne Aberrationen und Größenvariationen. Dazu zählen zum einen die laterale, wie auch eine parallele Ausrichtung mit einem definierten Abstand zwischen Maske und Substrat, um eine homogene vollflächige Belichtung zu gewährleisten. Für eine präzise Einstellung werden Halter- und Justiervorrichtungen von Maske und Wafer benötigt, um den Belichtungsvorgang exakt und reproduzierbar auszuführen.

Grundlegende Anforderungen richten sich an eine sehr genaue Ebenheit des Substrathalters, sowie qualitativ hochwertige Photomasken mit sehr geringer Durchbiegung, sowie Substrate, insbesondere Wafer, mit konstanten Dicken.

Integrierte Kamerasysteme und/oder Mikroskope ermöglichen seriell laterale Ober- und Rückseitenjustierung von Maske zu Substrat anhand von sogenannten Justiermarken. Je nach Bedarf und abhängig vom angewandten Prozess ist auch eine manuelle Justierung möglich. Darüber hinaus müssen lokale Schwankungen des Abstandes zwischen Substrat und Photomaske kontrolliert und minimal gehalten werden. Verschiedene Methoden kommen industriell zum Einsatz:

Um die Photomaske und das Substrat parallel zueinander auszurichten, wird typischerweise im Mask Aligner eine mechanische Keilfehlerkompensation (engl. Wedge error compensation, WEC) [187] ausgeführt. Die einfachste Variante ist ein passiver Keilfehlerausgleich. Dabei werden

Substrat und Photomaske in Kontakt gebracht. Um die Kontaktfläche für Proximity-Belichtungen zu vermeiden, werden so genannte Proximity-Spacer zwischen Maske und Substrat verwendet. Wird dem WEC-Sensor der Kontakt signalisiert, wird diese Position als Referenzpunkt definiert. Von da aus bewegt sich der Chuck mit dem Substrat nach unten und der gewünschte Maske-Substrat-Abstand wird eingestellt.

Eine bessere Genauigkeit kann mit einer aktiven mechanischen Dreipunktmessung mittels piezogesteuerter Regelung während des gesamten Justiervorgangs erreicht werden [188]. Die Piezoregelung ermöglicht ein sehr exaktes Einstellen des Abstandes. Typischerweise findet bei den industriell genutzten Geräten zwar eine hochpräzise Abstandsregelung statt, aber keine Kontrolle bzw. Messung des tatsächlichen Abstandes. Dafür wurde ein optisches Abstandsmesssystem entwickelt, welches auf dem Prinzip der spektralen Reflektometrie aufbaut [9, 188]. Damit kann die Einstellung des Proximity-Abstandes mit einer Genauigkeit von 100 nm für Abstände von 10 – 400 μm sichergestellt werden. Die Anwendung dieses Abstandsmesssystems unterstützt die Reproduzierbarkeit und verbessert die Qualität der Ergebnisse.

Neben der aktiven Abstandmessung gibt es Methoden zur nachträglichen Bestimmung des verwendeten Maske-Substrat Abstandes. Diese Methoden können zur Verifizierung der Technologie und zusätzliche Kontrolle eingesetzt werden. Hierfür wurde von Harzendorf et al. [189] eine Abstandkontrolle entwickelt, die den Abstand zum Zeitpunkt der Belichtung ortsgebunden in den Photoresist überträgt und dort nach Entwicklung des Photoresistes ausgemessen werden kann. Beruhend auf dem Prinzip der Lasertriangulation kann der Abstand während des Belichtungsvorganges mittels der Belichtungsergebnisse im Photoresist verifiziert werden. Diese Methode wurde beispielsweise genutzt, um die Gap-Variation über einen 4 Zoll Wafer zu visualisieren. Auf diese Weise konnte gleichzeitig die Genauigkeit und somit der Einfluss der verschiedenen WEC Methoden gegenübergestellt werden.

Die Genauigkeit, die mit Piezo gesteuerter und reflektrometrischer Unterstützung erreicht wird, ist um ein Zehnfaches besser als die mechanische 3-Punkt-Keilfehlerkompensation [9]. Somit konnte das im Rahmen dieser Arbeit genutzte System eine minimale Gap Variation über den gesamten 4 Zoll Wafer von lediglich 1 μm sicherstellen.

Zum Thema Abstandsmessung gibt es weitere unterschiedliche Ansätze, insbesondere hinsichtlich vorstrukturierter Photomasken. Diese werden jedoch oft nur wissenschaftlich entwickelt und sind meist zu komplex oder aufwändig, sodass sie industriell nicht genutzt werden [9].

Das Gesamtpaket aus einer zuverlässigen Abstandseinstellung von Maske und Substrat und der Sicherstellung der Parallelität beider sowie eine vollständige homogene und telezentrische Beleuchtung der Photomaske ist der Grundstein für eine erfolgreiche Herstellung hoch aufgelöster mikrooptischer Strukturen unter Verwendung von Photomasken und Substraten höchster Güte [190]. Die Homogenität der Beleuchtung bestimmt maßgeblich die Qualität der Strukturen auf dem Wafer. Eine Verkipfung des zu belichtenden Wafers führt zu ungleichmäßiger Auflösung und Inhomogenitäten über die Waferfläche.

Die Regulierung dieser Parameter definiert die Basis für die Anwendung verschiedener Methoden und Techniken, die z.B. die erreichbare Auflösung über die Limitierung des Schattenwurfs hinaus verbessern.

3.4 Auflösungssteigernde Methoden

Sogenannte auflösungssteigernde Techniken, kurz RETs (engl. Resolution enhancement techniques) verbessern Auflösung und Qualität, insbesondere den Kontrast der lithografischen Luftbilder. Diese Techniken werden in der Regel unter Verwendung einer bestimmten Beleuchtungswellenlänge definiert, können aber prinzipiell unabhängig vom System oder der Technologie angewendet und angepasst werden.

So werden Methoden, die in der optischen Lithografie der Halbleiterfertigung schon innerhalb der letzten zwei Dekaden entwickelt und etabliert wurden [168, 191], nach und nach in die Mask Aligner Lithografie adaptiert. Außeraxiale Beleuchtungswinkel (engl. Off-axis illumination, OAI) [6] können in der Projektionslithografie beispielsweise standardgemäß genutzt werden. Zahlreiche Aperturen, vergleichbar der IFP im Mask Aligner, werden seit den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts in Lithografie-Stepper integriert [191]. Für die Mask Aligner ist die definierte Wahl außeraxialer Beleuchtungswinkel mit der Entwicklung und Einführung der „MO Exposure Optics“ möglich geworden [183].

Neben der Nutzung definierter Beleuchtungswinkel sind Methoden wie die optische Nahbereichskorrektur (engl. Optical proximity correction, OPC) oder phasenschiebende Photomasken (engl. Phase-shifting photomask, PSM) ebenfalls etablierte RETs der Projektionslithografie, die mittlerweile auch sehr erfolgreich in der Mask Aligner Lithografie Verwendung finden.

Insbesondere die im Kapitel zuvor beschriebene reflektometrische Abstandsmessung von Maske und Wafer, sowie die selektive Wahl spezifischer Beleuchtungswinkel ermöglichen neue darauf aufbauende komplexe Techniken zur Auflösungsverbesserung oder zur Generierung neuer Strukturen.

3.4.1 Nahfeldholografie mit Mask Aligner

Die Methode der Nahfeldholografie wird verwendet, um Gitter mit hohen Auflösungen zu erzeugen. Laterale Strukturdimensionen kleiner der verwendeten Beleuchtungswellenlänge können hergestellt werden.

Das Prinzip der Nahfeldholografie ähnelt der im Kapitel 2.1.2.3 beschriebenen Interferenzlithografie, nur dass zur Musterformung, bzw. zur Erzeugung der interferierenden Strahlen eine Gittermaske verwendet wird. Zur Herstellung von Faser-Bragg-Gittern ist diese Methode bereits Teil eines etablierten Prozesses [192, 193]. Mit der Anwendung der Nahfeldholografie im Mask Aligner können hoch aufgelöste und großflächige Strukturen erzielt werden. Dabei garantiert die Verwendung einer Photomaske im Allgemeinen eine hohe Reproduzierbarkeit.

Ein weiterer Vorteil in der Nutzung einer Phasenmaske liegt in einer geringeren Anforderung an die Kohärenz der Belichtungsquelle [194]. Die holografische Methode (Interferenzlithografie) benötigt eine sehr gute räumliche sowie zeitliche Kohärenz der interferierenden Strahlen. Die zeitliche Kohärenz der Lichtquelle für die Nahfeldholografie ist deutlich unkritischer, da die Entfernung der Photomaske zum Substrat für die beiden interferierenden Strahlen, im Fall einer Zweistrahlinterferenz, identisch ist. Die erreichbare Schärfentiefe des entstehenden Interferenzmusters hängt im Wesentlichen von der räumlichen Kohärenz sowie von dem Beugungswinkel ab.

Werden Gitterperioden p zwischen $\lambda < p < 2\lambda$ mit einer senkrechten Beleuchtung der Photomaske verwendet, resultiert daraus eine symmetrische Ausbreitung der ± 1 . und 0. Beugungsordnungen, wobei λ die Beleuchtungswellenlänge darstellt. Im Allgemeinen wird das optische Design der Photomaske so gewählt, dass nur zwei Beugungsordnungen interferieren und somit eine Art Zweistrahlinterferenz erzeugt wird. Denn ein optimales Ergebnis wird erreicht, wenn die Unterdrückung der 0. Beugungsordnung gelingt, da eine dritte interferierende Komponente eine zusätzliche Modulation in z-Richtung erzeugt, womit sich der Bereich, in dem das Belichtungsmuster nutzbar ist, einschränkt. Die Stärke der Modulation ist abhängig von der Intensität der 0. Ordnung [195]. Eine vollständige Unterdrückung der 0. Beugungsordnung ist allerdings nicht trivial. Eine Optimierung findet typischerweise über die Kontrolle der Ätztiefe sowie des Füllfaktors der Phasenmaske statt.

Bourgin et al. [196] haben gezeigt, dass mit einem Gitter bestehend aus bzw. beschichtet mit höherbrechendem Material, eine nahezu vollständige Unterdrückung der 0. Ordnung erlangt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, ausschließlich zwei interferierende Beugungsordnungen zu erhalten, ist eine schräge Beleuchtung der Photomaske, sodass z.B. nur die -1. und 0. Beugungsordnung sich ausbreiten und interferieren [197, 198]. Ein hoher Kontrast ist allerdings nur erreichbar, wenn beide interferierenden Beugungsordnungen gleiche Intensitäten haben. Diese Methode ist kompliziert, da das Strukturierungsergebnis neben dem Photomaskendesign vom Einfallswinkel abhängt. Für die Mask Aligner Lithografie mit dem in dieser Arbeit verwendeten Gerät bedeutet dies eine präzise Selektion der Beleuchtungswinkel. Basierend auf der in Kapitel 3.3 vorgestellten Funktionsweise können die Beleuchtungswinkel der Photomaske mittels einer Apertur, der IFP, im Strahlengang selektiert werden. Für jede neue Konstellation muss eine neue IFP gefertigt werden. Dabei kann die Selektion der Winkel mit einer Genauigkeit von etwa $0,3^\circ$ erfolgen.

Für eine senkrechte Beleuchtung der Photomaske mittels Mask Aligner und dem im Kapitel 3.3.1 beschriebenen Beleuchtungssystem besteht das Problem in der Beziehung vom Öffnungsdurchmesser der IFP zur Belichtungszeit. Um eine möglichst ausschließlich senkrechte Beleuchtung der Photomaske zu erzeugen, muss die Blendenöffnung so klein wie möglich sein, aber noch groß genug, um akzeptable Belichtungszeiten zu ermöglichen. Je größer das Winkelspektrum, desto geringer wird der Kontrast des entstehenden Interferenzmusters.

Um das entstehende sinusförmige Luftbild der interferierenden Beugungsordnungen großflächig im Mask Aligner nutzen zu können, muss das Substrat nah an der Photomaske

platziert werden. Mit wachsendem Abstand zwischen Maske und Substrat verringert sich auch die strukturierbare bzw. interferierende Fläche, abhängig von den Beugungswinkeln der interferierenden Ordnungen sowie der Gitterfläche in der Photomaske. Diese Problematik wird in Abb. 12 deutlich. Die Grafik zeigt eine Simulation einer möglichen Konstellation für die Nahfeldholografie. Dafür wird eine Phasenmaske mit einer Periode von $p = 600 \text{ nm}$ mit kollimiertem Licht der Wellenlänge $\lambda = 365 \text{ nm}$ unter senkrechtem Einfall beleuchtet. Die Stegbreiten sowie die Tiefe der Gräben wurden so optimiert, dass die 0. Beugungsordnung lediglich eine transmittierte Beugungseffizienz für transversal elektrisch (TE*) polarisiertes Licht von 2% aufweist. In Abb. 12 wird das starke Auseinanderlaufen der ± 1 . Beugungsordnungen deutlich.

Um eine großflächige Strukturierung zu ermöglichen, muss der Abstand zwischen Photomaske und Substrat abhängig von den Beugungswinkeln teilweise sehr klein gewählt werden, ohne dabei den Kontakt beider zu riskieren.

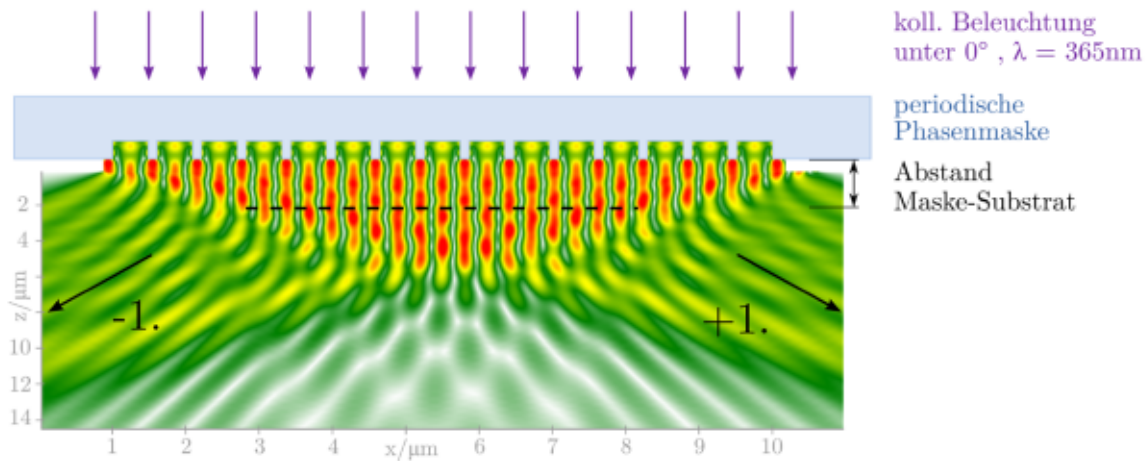


Abbildung 12: Nahfeldholografie mittels Phasenmaske. Die ± 1 . Beugungsordnungen interferieren im Nahfeld der Photomaske miteinander. Die Größe der strukturierbaren Substratfläche hängt von den Beugungswinkeln der interferierenden Ordnungen sowie der strukturierten Fläche der Photomaske ab.

Die erreichbare Auflösung der Gitterperioden p_{max} mittels dieser Methode ist allerdings limitiert und resultiert aus der verwendeten Periode der Photomaske p_{Maske} mit

$$p_{max} = \frac{p_{Maske}}{2}. \quad (3.3)$$

Dieser Zusammenhang ergibt sich aus der Verwendung der Formel (2.1) zur Berechnung der erzeugbaren Periode mittels Interferenzlithografie, wobei der in dieser Formel angegebene Winkel Φ in Fall der Nahfeldholografie dem Beugungswinkel der interferierenden ± 1 . Beugungsordnung der Photomaske entspricht und mit

$$\sin \Phi = \pm \frac{\lambda}{p_{Maske}} \quad (3.4)$$

substituiert werden kann.

* Für transversal elektrisch (TE) polarisiertes Licht ist der elektrische Feldvektor des einfallenden Lichtes parallel zu den Gitterstegen ausgerichtet. Für transversal magnetisch (TM) polarisiertes Licht ist dieser orthogonal zu den Gitterstegen orientiert.

Neben der eingeschränkten Auflösung sind auch die realisierbaren Strukturgeometrien mittels Zweistrahlint interferenz begrenzt; vergleichbar der holografischen Methode [199]. Nichtsdestotrotz ermöglichen die Entwicklung der Photomaskenbeleuchtung (Homogenität, Winkelselektivität) sowie eine präzisere Einstellung des Maske-Substrat-Abstandes neue Ansätze z. B. für eine 3-Strahlinterferenz beispielsweise zur Herstellung dreidimensionaler Strukturen mittels Mask Aligner.

3.4.2 Phasenmasken

Konventionell werden für die Schattenwurflithografie binäre Photomasken verwendet, die die Amplitude des transmittierenden Lichtes modulieren. Phasenmasken wurden ursprünglich konzipiert, um die Beugungseffekte zu minimieren und damit die erzielbare Auflösung für die Halbleiterelemente zu verbessern [200, 201].

Auch in der Mask Aligner Lithografie erlauben Phasenmasken einen bedeutenden Einfluss auf die finale Struktur und ermöglichen die Kompensation von Beugungseffekten. Die Modulation der Phase ist ein weiterer Freiheitsgrad für eine Auflösungssteigerung und die Optimierung der Strukturqualität und -größe über die Limitierung des Schattenwurfs hinaus. Außerdem bietet die fehlende Chromschicht der Photomaske den Vorteil einer verbesserten Lichtausbeute.

Die phasenschiebende Funktionsweise der Photomaske kann auf verschiedene Weise implementiert werden [202]. Die Modulation der Phase wird durch unterschiedliche optische Weglängen des transmittierenden Lichtes realisiert. Die Änderung des optischen Weges kann so zum Beispiel durch tief geätzte Bereiche in der Quarzglasmaske oder durch das Aufbringen eines so genannten Absorbermaterials realisiert werden, wobei letzteres die Amplitude des transmittierenden Lichtes ebenfalls beeinflusst.

Ein relativ einfaches Beispiel für die Verwendung von Phasenmasken zur Auflösungssteigerung der Mask Aligner Lithografie ist die Methode der Nahfeldholografie wie im Kapitel zuvor beschrieben. Weitaus komplexere Beispiele werden in Kapitel 4 präsentiert. Dort wird gezeigt, wie mit Hilfe von Simulationen maßgeschneiderte komplexe Photomasken für spezifische Problemstellungen entwickelt werden können. Die Verwendung von Phasenmasken bedeutet das Nutzen erweiterter Freiheitsgrade zur Optimierung verschiedener Aufgaben, wie z.B. senkrechter Blaze-Rückflanken bei Gittern oder die Verbesserung der Auflösung nicht-periodischer Strukturen.

3.4.3 Der Talbot Effekt

Bei dem Talbot Effekt handelt es sich um einen Beugungseffekt an einer periodischen Struktur, z.B. einem optischen Gitter. Dieser Effekt wurde 1836 zum ersten Mal von W. H. F. Talbot beobachtet und beschreibt die Selbstabbildung der beleuchteten Struktur als natürliche Konsequenz der Fresnel Beugung [203, 204].

Als Talbot Distanz bezeichnet man die Distanz in der sich die Selbstabbildung der periodischen Struktur zeigt. In Bezug auf die Mask Aligner Lithografie wird in diesem Abstand zur Photomaske typischerweise das Substrat positioniert.

Die Talbot Distanz lässt sich nach der Gleichung

$$d_T = \frac{\lambda}{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}} \quad (3.5)$$

berechnen [205].

Dabei definiert λ die Beleuchtungswellenlänge monochromatischen Lichtes und p die Periode der Struktur der Photomaske. Für $p \gg \lambda$, kann die Talbot Distanz vereinfacht mittels

$$d_T = \frac{2p^2}{\lambda} \quad (3.6)$$

abgeschätzt werden.

Wird das Substrat in der Talbot-Distanz platziert, kann das Luftbild, welches einer Replikation der Maskenstruktur entspricht, in den Photoresist übertragen werden. Dabei kann eine Auflösung insbesondere für große Proximity-Abstände erreicht werden, die mit den Gegebenheiten des Schattenwurfs nicht erreichbar wäre. So kann zum Beispiel ein periodisches, binäres Maskendesign mit einer Periode von $3 \mu\text{m}$ und einem Öffnungsverhältnis* von $1/6$ im Talbot-Abstand adäquat in Photoresist reproduziert werden. Abbildung 13 zeigt die Simulation der Intensitätsverteilung ausgehend von der Photomaske für eine Propagationslänge von $50 \mu\text{m}$ entlang der Ausbreitungsrichtung z . Unter Nutzung der i-Linie der Quecksilberdampfampe als Beleuchtungswellenlänge entsteht das Abbild des Gitters in $d_T = 49,3 \mu\text{m}$.

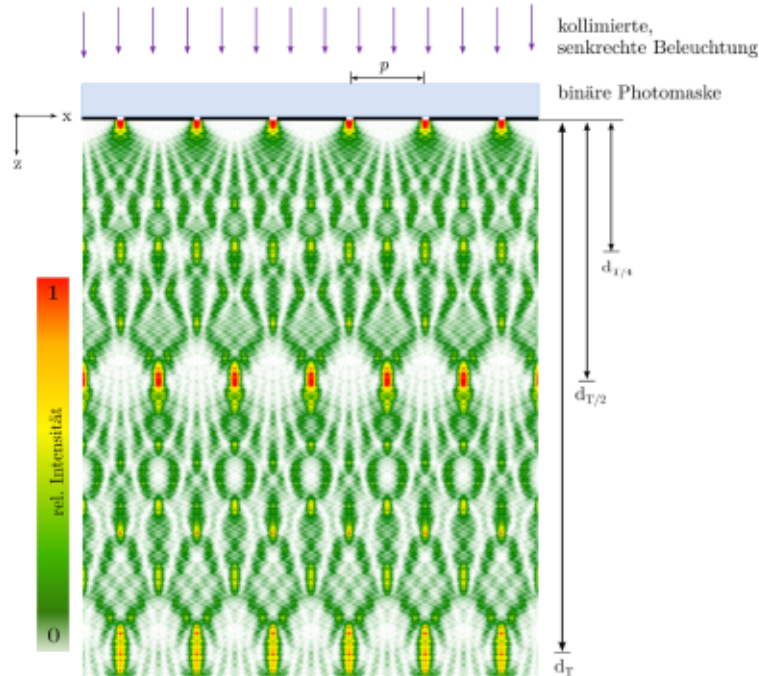


Abbildung 13: Simulation des Beugungsbildes und des Talbot Effektes für ein periodische Photomaskengitter unter Annahme einer monochromatischen Beleuchtung. Die Propagation entlang der Ausbreitungsrichtung z ergibt verschiedene Talbot-Ebenen, in denen sich eine Replikation der periodischen Maskenstruktur wiederfindet.

* Das Öffnungsverhältnis einer binären Photomaske beschreibt das Verhältnis zwischen Aperturöffnung zur Periode.

Unter idealen Bedingungen entstehen innerhalb der Talbot-Distanz verschiedene Vielfache der beleuchteten Gitterstruktur. So ergibt sich z.B. in $d_T/2$ die periodische Struktur lateral um $p/2$ verschoben oder in $d_T/4$ die Struktur mit der halben Periode.

Mittels einer zusätzlichen strukturierten Beleuchtung, d.h. spezifisch gewählter Winkelspektren, können periodische Strukturen beliebiger Geometrien hergestellt werden, wie Stürzebecher et al. demonstrierten [206]. In einem weiteren Beispiel wurde der Talbot-Effekt unterstützend für die Grautonlithografie zur Erzeugung kontinuierlicher Oberflächenprofile genutzt [207].

Ein entscheidender Nachteil des Talbot Effektes ist die geringe Schärfentiefe der Abbilder in den Talbot-Distanzen, womit es z.B. schwierig ist, dicke Photoresiste zu strukturieren. Darüber hinaus erfordert seine Nutzung eine präzise Einstellung des Abstandes von Maske und Substrat sowie eine hohe Ebenheit von Substrat und Photoresist.

Solak et al. [208] haben gezeigt, dass eine Integration über eine Talbot-Distanz mittels vertikaler Verschiebung des Substrates während einer Belichtung die erreichbare Schärfentiefe verbessern kann. Diese Methode zeigt eine weitere Möglichkeit, hoch aufgelöste periodische Strukturierungen mittels Mask Aligner Technologie zu realisieren.

3.4.4 Optical Proximity Correction (OPC)

Die optische Nahbereichskorrektur (engl. Optical proximity correction, OPC) gehört zu den ersten entwickelten RETs, um die Form der finalen Ergebnisse zu verbessern, wie z. B. Kantenverrundung, oder Linienverkürzungen, die hauptsächlich aufgrund von Beugungs- und Interferenzeffekten entstehen. Dabei handelt es sich um Hilfsstrukturen, Polygone, die zur Photomaskenstruktur hinzugefügt werden. Die Dimensionen dieser Strukturen sind kleiner als die verwendete Beleuchtungswellenlänge und werden deswegen nicht einzeln aufgelöst, haben aber Einfluss auf das Beugungsbild. Aufgrund ihrer Dimensionen werden diese Strukturen auch als SRAFs (engl. Sub-resolution assist-features) bezeichnet.

Die OPC ist besonders für vereinzelte, nicht-periodische Strukturen enorm wichtig, um ungewünschte Beugungseffekte zu minimieren. Für derartige Strukturen kann der Talbot-Effekt nicht zur Auflösungssteigerung verwendet werden. In Abb. 14 sind „regel-basierende“ OPC Strukturen (engl. Rule-based OPC) am Beispiel einer L-Struktur dargestellt.

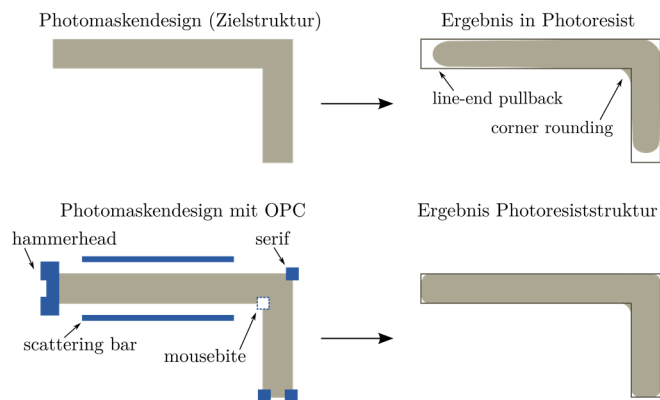


Abbildung 14: OPC kompensiert durch Beugung verursachte Defekte und erzielt dadurch eine optimierte Annäherung an die Zielstruktur [209].

Die Regeln für die Platzierung der in Abb. 14 dargestellten OPC Strukturen sind relativ einfach: z.B. werden Linienverkürzungen mit einem „Hammerhead“ kompensiert, oder dünner werdenden Linien wird mit „scattering bars“ entgegen gewirkt. Einem bestimmten Objekt ist eine bestimmte Korrektur zugewiesen (Linie, Linienende, innere Ecke, äußere Ecke). Diese OPC Strukturen werden auch als „manuelle OPC“ bezeichnet und können individuell den Objekten hinzugefügt werden.

Eine andere Variante der OPC Integration beruht auf einem iterativen Verbesserungsprozess von simulationsbasierten Experimenten mit Teststrukturen und deren Analyse. Diese Variante wird als „model-based“ OPC bezeichnet und ist mittlerweile Teil der computergestützten Lithografie (engl. computational lithography) [210, 211]. Simulationen ermöglichen das Einsparen verschiedener Experimente und somit eine enorme Kostenreduzierung. Der Einfluss von Beleuchtung und Hilfsstrukturen kann so im Vorfeld evaluiert und das Photomaskendesign angepasst werden. In der Herstellung von Halbleiterstrukturen ist das automatische Hinzufügen von OPC Strukturen mittels Software etabliert.

In der Mask Aligner Lithografie und insbesondere für die Herstellung mikrooptischer Elemente sind die Designs und Applikationen sehr spezifisch, sodass hier die „regelbasierte“ Variante weit verbreitet ist. Dennoch helfen Simulationen, die Größe und Lage der OPC Strukturen zu bestimmen. Somit kann auf zahlreiche Testbelichtungen verzichtet werden. Motzek et al. [212 - 214] haben sich intensiv mit dem Einfluss von OPC Strukturen für die Mask Aligner Lithografie beschäftigt und zeigen, dass beste Ergebnisse mit einer Kombination aus strukturierter Beleuchtung und optimierten Maskenstrukturen mit OPC erzielt werden können. Dabei steht die Simulation verschiedener Maskenstrukturen in Kombination mit verschiedenen Winkelspektren der Beleuchtung im Mittelpunkt. Um abschließende effektive Aussagen über die finale Struktur zu treffen, ist eine Simulation der Entwicklung des Photoresistes abhängig von der Belichtung notwendig [215]. Ein auf die Struktur abgestimmtes Winkelspektrum unter Berücksichtigung der Photoresisteigenschaften kann die finale Strukturqualität bedeutend verbessern.

Eine Optimierung der angepassten bzw. strukturierten Beleuchtung kombiniert mit OPC Strukturen wird auch als „Source-Mask-Optimization“, kurz SMO, bezeichnet. Dieser Ausdruck wurde ursprünglich in der Projektionslithografie geprägt, gewinnt aber auch für die Mask Aligner Lithografie immer mehr an Bedeutung.

Als „Advanced Mask Aligner Lithografie“ bezeichnen Voelkel et al. [216] eine neue Ära der Mask Aligner Lithografie, bei der verschiedene RETs der Projektionslithografie auch in der Mask Aligner Lithografie signifikanten Einfluss auf die finalen Strukturen nehmen und die Auflösung der Mask Aligner Lithografie verbessern. Darüber hinaus erhält auch die Simulation für die Optimierung der Belichtungsparameter einen wichtigen Stellenwert. Simulationen werden immer essentieller und ersparen teilweise umfangreiche Vorlauf-tests und können den Herstellungsprozess verbessern [217, 218].

4 Alternative Photomasken-Technologien für individuelle Problemstellungen

Nachdem in den vorausgegangenen Kapiteln der Stand der Technik evaluiert wurde, werden in den folgenden Kapiteln die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ergebnisse präsentiert und diskutiert. Während dieses Kapitel den Fokus auf das Design und die Verwendung der Photomaske legt, ist die Mask Aligner Beleuchtung Schwerpunkt in Kapitel 5.

Anspruchsvolle Strukturgeometrien und hohe Auflösungen erfordern problemorientierte Lösungen, bei denen konventionelle binäre Photomasken hinsichtlich Auflösung oder Strukturgeometrie an ihre Grenzen stoßen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten verschiedene Problemstellungen mit Hilfe eines optimierten Photomaskendesigns gelöst werden. Abschnitt 4.2 zeigt die Erzeugung nicht-periodischer Strukturen mittels mehrstufiger Photomaske und Abschnitt 4.3 die Entwicklung einer doppel-seitig strukturierten Photomaske für eine verbesserte Schärfentiefe zur Strukturierung dicker Lacke.

Bereits im Abschnitt 3.4.4 wurde gezeigt, welchen Einfluss kleine Änderungen der Photomaskenstruktur (OPC) auf das Strukturierungsergebnis haben. Die Photomaske kann als Schlüsselement der Photolithografie betrachtet werden. Sie enthält alle wichtigen Informationen, die lithografisch übertragen und vervielfältigt werden sollen. Setzt man ein definiertes Beleuchtungssystem inklusive konstanter Belichtungswellenlänge und einen festgelegten Maske-Substrat-Abstand voraus, so ergeben sich die einzigen veränderbaren Freiheitsgrade bei der Photomaske. Dazu zählen z.B. die Anzahl der phasen- und amplitudenmodulierenden Level, oder auch der Transmissionsgrad. Für die Mask Aligner Lithografie ist die Photomaske eine zentrale Komponente.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden standardisierte 6 Zoll Substrate aus synthetischem Quarzglas (SiO_2) verwendet. Die Maskengrößen werden meist in der amerikanischen Längeneinheit *Zoll* (*engl. Inch, in*) angegeben. Die hier verwendeten Substrate haben eine Kantenlänge von 152,4 mm (6 in) und eine Dicke von 6,35 mm (0,25 in), gemäß der Halbleiter-Norm (SEMI P1-1101).

Binäre Photomasken besitzen eine zusätzliche Schicht aus Chrom und Chromoxid für eine Amplitudenmodulierung des transmittierten Lichtes. Die Strukturierung dieser Chromschicht erfolgt mittels Elektronenstrahlolithografie (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Diese ermöglicht die Herstellung hoch aufgelöster Strukturen mit sehr hoher Platzierungsgenauigkeit [142, 144, 219]. Auf die Chromschicht wird zunächst ein elektronenempfindlicher Resist aufgetragen, der dann mit einem Elektronenstrahlschreiber belichtet und anschließend entwickelt wird. Mittels Trockenätzen kann die im Resist definierte Struktur in die Chromschicht übertragen werden [220, 221]. So entstehen die transmittiven Bereiche der binären Photomaske. Für die Herstellung von Phasenmasken, kann die Chromschicht als Hartmaske für das selektive Tiefätzen in das Quarzglas genutzt und so ein Höhenprofil in SiO_2 erzeugt werden [222]. Die beschriebenen Lithografieschritte können je nach Maskenanforderungen erweitert und wiederholt werden. Somit ist es möglich ein Höhenprofil in Quarzglas mit verschiedenen Ebenen zu generieren. Einfache

binäre Photomasken, d.h. entweder eine Strukturierung der Chromschicht oder eine binäre Strukturierung des Glassubstrates (ohne verbleibende Chromschicht) stellen die für die Fertigung einfachsten Varianten dar, da nur ein einmaliger Lithografieschritt erfolgen muss.

Der Erfolg der Herstellung der entwickelten Photomasken ist an unterschiedliche Prozesse gebunden. Entscheidende Parameter werden durch die Wahl der Elektronenstrahlolithografie vorgegeben. Darüber hinaus hat auch der Ätzprozess von Chrom und Quarzglas einen Einfluss auf die finale Strukturierung. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick der wichtigsten Parameter für die Strukturierung einer Photomaske im Rahmen dieser Arbeit.

Minimale Strukturbreite	100 nm
Toleranz der Strukturbreite	± 20 nm
Positioniergenauigkeit	± 15 nm
Rel. Toleranz der Ätztiefe in SiO_2	5 - 6 % für 6“ Maske
max. Aspektverhältnis in SiO_2	1:10

Tabelle 1: Parameter für die Photomaskenherstellung für die Mask Aligner Lithografie mittels Elektronenstrahlolithografie und anschließenden Trockenätz-Prozessen unter Verwendung eines Elektronenstrahlschreibers Typ SB350 der Firma Vistec Electron Beam GmbH und einer ICP-RIE Ätzanlage Typ SI-500-300 der Firma Sentech Instruments GmbH.

4.1 Erzeugung periodischer Strukturen

Für die Herstellung hoch aufgelöster periodischer Strukturen mittels Mask Aligner Lithografie benötigt man ebenfalls hoch aufgelöste Photomasken. Ziel dabei ist es, diese Strukturen auch großflächig unter Verwendung eines möglichst großen Maske-Substrat-Abstands zu realisieren. Periodische Strukturen erinnern an die Nutzung des Talbot-Effektes oder der Nahfeldholografie. Allerdings sind die begrenzte Schärfentiefe der Talbot-Lithografie sowie der geringe Arbeits-Abstand bei der Nahfeldholografie störende Limitationen. Die Erzeugung eines periodisch definierten Intensitätsprofils in einem festen Abstand zur Photomaske mit hoher Schärfentiefe kann unter Verwendung einer binären Photomaske nicht gewährleistet werden. Rigorose Berechnungen und Optimierungsalgorithmen können hier weiterhelfen. Mittels rigoroser gekoppelter Wellenanalyse (engl. Rigorous coupled-wave analysis, RCWA) [223, 224] kann eine exakte Berechnung der transmittierenden Beugungsordnungen an periodischen hochaufgelösten Mikro- bis Nanometerstrukturen erfolgen, woraus sich gleichzeitig das Luftbild berechnen lässt. Dabei werden ebenfalls Beleuchtungseigenschaften wie Wellenlänge, Polarisierung und Einfallswinkel in die Berechnungen mit einbezogen. Somit können komplexe Photomaskenprofile für die Erzeugung eines optimierten Luftbildes entwickelt werden. Stürzebecher et al. [225] entwickelten z.B. eine dreistufige Photomaske mit einer Periode $p_{\text{Maske}} = 1,6 \mu\text{m}$, um ein periodisches Luftbild mit einer Periode von $p = 800 \text{ nm}$ in einem Proximityabstand $d = 39 \mu\text{m}$ und einer Schärfentiefe $\text{DOF} > 5 \mu\text{m}$ zu erzeugen.

Die Herstellung hoch aufgelöster, periodisch-binärer Nanostrukturen mittels rigoros-optimierter Photomasken für die Mask Aligner Lithografie ist eine erst jüngst entwickelte Technologie [225,

226]. Diese Art der Optimierung ermöglicht Strukturen sehr hoher Auflösung, mit verbesserter Schärfentiefe sowie kontrastreichem Luftbild zur Strukturierung des Photoresistes.

Die Erzeugung kontinuierlicher Profile mittels binärer Photomaske

Neben binären periodischen Strukturen sind auch periodische Strukturen mit kontinuierlichen Oberflächenprofil von hohem Interesse für diverse Anwendungen [105, 227 - 231]. So stellen beispielsweise Blazegitter aus Anwendersicht eine der wichtigsten Formen kontinuierlicher Strukturen dar. Blazegitter sind insbesondere für Spektrometer sowie für Elemente zur Laserstrahlablenkung und/oder -teilung von hoher Bedeutung. Breitbandige Gitter, wie Echelle Gitter sind z.B. wichtig für astronomische Beobachtungstechniken, bei denen mitunter auch hohe Effizienzen in hohen Beugungsordnungen benötigt werden [105, 232]. Die Verwendung von Blazestrukturen ermöglicht, dass eine maximal erreichbare Effizienz einer einzelnen Beugungsordnung für eine bestimmte Wellenlänge oder einen definierten Wellenlängenbereich zugeordnet werden kann. Transmissionsgitter sind von hohem Interesse, da sie für das optische Design höhere Flexibilität oder auch die Reduzierung der finalen Gerätedimensionen bedeuten können [233].

Der Anspruch der vorliegenden Arbeit besteht allerdings nicht in der Optimierung erreichbarer Effizienzen. Hierzu gibt es bereits zahlreiche, verschiedene Ansätze in der Literatur [34, 234 - 237]. Vielmehr sollen im aktuellen Abschnitt neue Herstellungsmöglichkeiten bzw. -optimierungen für kontinuierliche Oberflächenprofile, am Beispiel eines Blazegitters, vorgestellt werden.

Blazestrukturen bzw. im Allgemeinen kontinuierliche Strukturen, können mit verschiedenen Methoden hergestellt werden. Eine Herstellungsmöglichkeit bietet die Analoglithografie direkt-schreibender Verfahren, wie der Laserstrahl- oder Elektronenstrahlolithografie, die mittels örtlicher Intensitätsmodulation der Belichtung das resultierende Fotoresistprofil erzeugen. Mittels Laserstrahlolithografie sind allerdings nur limitierte Perioden und Aspektverhältnisse möglich. Hochauflösende Blazegitter werden typischerweise mittels Elektronenstrahlolithografie realisiert [238 - 241], die eine sehr akkurate Herstellung mittels variabler Dosis ermöglicht, allerdings sehr zeitaufwändig und kostenintensiv ist. Eine weitere Alternative bietet die Interferenzlithografie [242].

Neben der direkten Modulation der Intensitäten der Beleuchtungsquellen, kann die Bestrahlungsstärke auch mittels spezieller Photomasken variiert werden. Dafür kommen z.B. HEBS-Gläser* (engl. High energy beam sensitive glasses) [169, 243] sowie andere Grauton- [244, 245] oder Halbtonmasken [207, 246 - 248] zum Einsatz. Grautonmasken besitzen lokal veränderte Transparenzen, mit deren Hilfe bei der Belichtung ebenfalls lokal veränderte

* HEBS-Glas [302, 304] ist ein spezielles Photomaskenglas der Firma Canyon Materials, Inc. zur Erzeugung von kontinuierlichen Transmissionsfunktionen. Dabei handelt es sich um weißes Kronglas, bestehend aus Silikaten, Metalloxiden, Halogeniden und Photoinhibitoren. Gegenüber energiereicher Strahlung reagiert das Glas empfindlich. Durch eine chemische Reaktion der Silberionen kommt es zur Schwarzfärbung der empfindlichen Schicht. Mittels Elektronenstrahlbelichtung mit variabler Dosis entsteht so eine *Grautonmaske*, die dann für Photolithografieprozesse weiterverwendet wird.

Intensitätsverteilungen hinter der Photomaske erzeugt werden, welche anschließend, übertragen in den Photoresist, das kontinuierliche Profil generieren. Die verschiedenen Transparenzen werden zum Beispiel durch verschiedene optische Dichten metallischer Dünnschichten auf dem Quarzglas oder mit einem sogenannten HEBS-Glas realisiert. Die Herstellung dieser speziellen Grautonmasken ist allerdings sehr aufwändig und somit kostenintensiv. Bei Halbtonmasken, die vorrangig Anwendung in Projektionslithografie mittels Wafer-Stepper finden, variieren die Größen der Maskenstrukturen, d.h. der Chromöffnungen. Dabei sind diese Elemente so klein, dass sie für die Strukturübertragung selbst nicht aufgelöst werden können, sondern nur den Transmissionsgrad kontrollieren. Dadurch lassen sich ebenfalls örtlich variierende Intensitätsverteilungen erzielen. Dabei handelt es sich gegenüber Grautonmasken um eine kostengünstigere Variante, die allerdings nur eine eingeschränkte Auflösung ermöglicht.

Die Mask Aligner Lithografie ermöglicht ebenfalls verschiedene Methoden zur kosteneffizienten Herstellung kontinuierlicher Oberflächenprofile mit hoher Auflösung. Eine technologisch relativ einfache Variante ist die Verwendung einer binären Photomaske in Kombination mit einem maßgeschneiderten Winkelspektrum der Beleuchtung. Harzendorf et al. [207] demonstrierten dies mit der Erzeugung einer $2\ \mu\text{m}$ periodischen Blazestruktur in Photoresist. Dabei wird das mittels IFP definierte dreieckförmige Winkelspektrum innerhalb einer Gitterperiode reproduziert. Diese Variante erzeugte eine relativ flache Blazestruktur mit einer ebenfalls flachen Rückflanke des Blazeprofiles.

Eine im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Methode zur Erzeugung kontinuierlicher Profile, besteht in einer Kombination aus einer lateralen Verschiebung einer einfachen binären Photomaske und einem mehrstufigen Belichtungsprozess mit variierter Beleuchtungsdosis. Diese Technologie wird im folgenden Abschnitt 4.1.1 ebenfalls am Beispiel eines geblazten Gitters vorgestellt.

Zuvor soll das zugrundeliegende optische Funktionsprinzip einer eindimensionalen geblazten Struktur kurz erläutert werden. Das hier betrachtete Blazegitter besteht aus einer Reihe von aufeinanderfolgenden Mikroprismen. Dabei soll die Periode p sowie die Höhe h bedeutend größer als die Beleuchtungswellenlänge λ sein. In Abb. 15 ist zum einen die Lichtbrechung an einem einzelnen Prisma, wie auch die Beugung an einem Sägezahngritter skizziert.

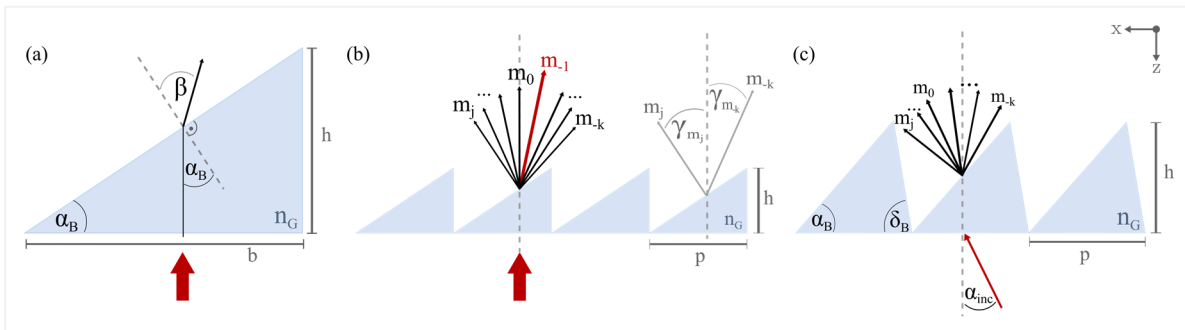


Abbildung 15: Vereinfachtes Funktionsprinzip einer Blaze- oder Sägezahnstruktur in Transmission auf Grundlage der (a) Strahlablenkung an einem Prisma unter senkrechter Beleuchtung. In (b) und (c) sind zwei Beispiele für Sägezahngritter mit variiertem Einfallswinkel α_{inc} sowie verschiedenen Blazewinkel α_B sowie Rückflankenwinkel δ_B dargestellt, die abhängig von Beleuchtung, Strukturhöhe h sowie Gitterperiode p unterschiedliche Effizienzen in unterschiedlichen Beugungsordnungen m aufweisen können. Reflektierte Beugungsordnungen sind nicht dargestellt.

Die Strahlablenkung an einem Prisma beruht auf der Brechung des Lichtstrahls am Übergang zweier verschiedener Medien. Wird ein einzelnes Prisma bzw. ein keilförmiges Element, wie in Abb. 15 (a) dargestellt, senkrecht mit einer ebenen Welle mit definierter Wellenlänge λ beleuchtet, wird das Licht in einem bestimmten Winkel β ablenkt. Aus geometrischen Zusammenhängen ergibt sich

$$\tan \alpha_B = \frac{h}{b}. \quad (4.1)$$

Der Einfallswinkel bezogen zum Lot der Austrittsfläche entspricht dem Blazewinkel α_B des Keils, welcher sich über die Höhe h sowie die Breite b definiert. Der resultierende Ablenkungswinkel β kann folglich mittels Snelliusschem Brechungsgesetz entsprechend

$$n_L \cdot \sin \beta = n_G \cdot \sin \alpha_B \quad (4.2)$$

berechnet werden. Dabei beschreibt n_G den Brechungsindex des Prismas und n_L den des umgebenden Mediums (Luft $n_L = 1$). Der Brechungswinkel β kann an einem Prisma mittels des Blazewinkels α_B gesteuert werden. Die Strahlablenkung an einem optischen Gitter kann allerdings strahlenoptisch nur ungenügend beschrieben werden.

Bei der Beleuchtung eines Gitters, wird Licht in unterschiedliche Richtungen gebeugt, wie in Abb. 15 (b) für senkrechte Inzidenz dargestellt. Die Form des Gitterprofils hat dabei keinen Einfluss auf die unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen der einzelnen Beugungsordnungen m . Unter Verwendung der Gittergleichung können die verschiedenen Winkel γ_m der einzelnen transmittierenden Beugungsordnungen mit

$$n_L \cdot \sin \gamma_m = \frac{m \cdot \lambda}{p} + n_G \cdot \sin \alpha_{inc} \quad (4.3)$$

bestimmt werden. Der Einfallswinkel α_{inc} sowie der Beugungswinkel γ_m werden mit Bezug zur Gitternormale, der in Abb. 15 (b) und (c) grau gestrichelten Linien, angegeben. Die Ausbreitungsrichtung der einzelnen Beugungsordnungen ist abhängig von der Gitterperiode für eine definierte Wellenlänge. Je kleiner die Periode, desto größer der Beugungswinkel.

Zur Berechnung der Intensitäten der propagierenden Beugungsordnungen muss allerdings auch die geometrische Form des Gitters berücksichtigt werden. Mit geeigneter Wahl des Gitterprofils können Amplitude und Phase der transmittierenden Welle gezielt beeinflusst werden [105]. Sägezahnartige Gitterprofile erlauben Licht einer definierten Wellenlänge oder für einen definierten Wellenlängenbereich höchst effizient einer definierten Beugungsordnung zuzuordnen. Eine maximale Effizienz in nur einer Beugungsordnung kann allerdings nur erzeugt werden, wenn die Blazebedingung mit

$$\gamma_m = (\beta - \alpha_B) \quad (4.4)$$

erfüllt ist. Ansonsten ergibt sich eine Aufteilung der Transmissionseffizienz auf mindestens 2 Beugungsordnungen. Laut skalarer Theorie kann ein Blazegitter 100% (ohne Fresnel-Verluste)

Beugungseffizienz in Transmission in der ersten Beugungsordnung für senkrechte Inzidenz erreichen. Dafür muss neben der Bedingung in (4.4) die Höhe h des Gitters so gewählt werden, dass sich eine Phasendifferenz von 2π beim Durchgang des Gitters ergibt.

Eine skalare Approximation der Beugungseffizienzen ergibt allerdings nur unter bestimmten Voraussetzungen genaue Ergebnisse. So beschränkt sich der Gültigkeitsbereich skalarer Berechnungen auf dünne Gitter ($h < \lambda$) mit großen Perioden im Bezug zur Beleuchtungswellenlänge ($p \gg \lambda$) [249, 250, 251]. Eine numerische Analyse z.B. mittels RCWA (Rigorous Coupled Wave Approach) oder der Modalmethode ermöglicht die Berechnung der exakten Beugungseffizienzen [223, 252 - 254].

So hat auch die Rückflanke des Blazegitters einen entscheidenden Einfluss auf die erreichbaren Beugungseffizienzen [255]. Für eine senkrechte Beleuchtung des Blazegitters wäre die Fertigung einer senkrechten Blaze-Rückflanke ($\delta_B = 0$) wichtig, ist aber schwer realisierbar. Um Abschattungseffekte bei der Beleuchtung von Blazestrukturen mit $\delta_B \neq 0$ zu reduzieren, werden auch Einfallswinkel mit $\alpha_{inc} \neq 0$ abhängig vom Rückflankenwinkel δ_B gewählt, wie in Abb. 15 (c) dargestellt.

Die Anforderungen an die einzelnen Strukturwinkel (Blaze-, Rückflankenwinkel) sowie an die Profiltiefe variieren und hängen dabei stark von der Anwendung selbst ab.

4.1.1 Kontinuierliche Oberflächenprofile mittels lateral verschiebbarer Photomaske

Strukturierungen im Mask Aligner mittels binärer Photomaske sind einfach und kosteneffizient. Die mögliche Auflösung ist allerdings limitiert, kann aber z.B. für periodische Strukturen mittels Talbot Effekt um ein Vielfaches verbessert werden. Nichtsdestotrotz ist das Applikationsspektrum unter Verwendung von binären Photomasken eingeschränkt.

Eine im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Erweiterung des Mask Aligners, ein lateral präzise verfahrbarer Photomaskenhalter, ermöglicht diverse Strukturvariationen mit ein und derselben Photomaske. So ist es z.B. möglich, mit einer binären Photomaske mit einem Gitterdesign ebenfalls kontinuierliche Profile zu generieren.

Abbildung 16 zeigt den speziell entwickelten Maskenhalter, der gemeinsam mit der Firma SUSS MicroTec AG realisiert wurde. Mit diesem ist es möglich, Photomasken mit definierten Schrittweiten im nm-Bereich lateral hoch präzise in x- und y- Richtung zu verfahren. Die hohe Genauigkeit wird mittels Piezo-Antrieb sichergestellt und gewährleistet eine sehr hohe Reproduzierbarkeit mit einer minimalen realisierbaren Schrittweite von 10 nm. Der maximale Verfahrensweg in x- oder y-Richtung beträgt 350 μm .

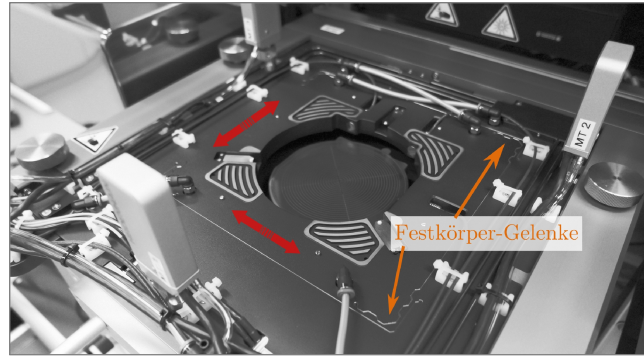


Abbildung 16: Neu entwickelter Photomaskenhalter für laterale Verschiebungen in x- und y-Richtung mit 10 nm Schrittweite in einem Mask Aligner der Firma SUSS MicroTec.

Um ein kontinuierliches Profil im Photoresist erzeugen zu können, muss eine vorgegebene Dosisverteilung im Resist erzeugt werden. Die entwickelbare Schichtdicke von für die Grautonlithografie entwickelte Photoresiste hängt im idealen Fall annähernd linear von der Belichtungsdosis ab [137]. Mit einer gezielten Schrittweite zur Änderung der Maskenposition bewirkt jede einzelne Belichtung eine spezifische Dosisverteilung im Photoresist, abhängig von der Belichtungsdosis und der Photomaskengeometrie. Je nach Periode und Photoresistdicke müssen Schrittweite und Dosis bestimmt und angepasst werden, um ein homogenes Photoresistprofil nach der Entwicklung des Resistes zu erhalten. Eine schematische Übersicht des allgemeinen Prozesses anhand einer 4-stufigen Belichtung ist in Abb. 17 dargestellt. Die Anzahl der Belichtungen kann beliebig erweitert werden, muss aber an die Photomaskenperiode sowie das Auflösungsvermögen angepasst werden.

Ein einfacher geeigneter Ansatz für die Schrittweite der Belichtung kann in Anlehnung an die minimal erreichbare Auflösung gewählt werden. Diese kann bei Verwendung des Talbot-Effektes in erster Abschätzung abhängig von dem Öffnungsverhältnis der eindimensionalen Gitterstruktur der Photomaske abgeleitet werden. Entsprechend der Aperturöffnungen eignet sich so z.B. eine Verschiebung um 500 nm für Strukturen mit $p \geq 2 \mu\text{m}$. Für kleinere Perioden oder präzisere Abstimmungen des Oberflächenprofils durch die einbringende Belichtungsdosis sind Schrittweiten zwischen 200 – 300 nm empfehlenswert. Für die Strukturierung von dickem Photoresist empfiehlt sich weiterhin, die Schrittweite je nach Dosis anzupassen. Denn je größer die Dosis, umso größer könnte die Überlappung der belichteten Bereiche im Photoresist bei gleicher Schrittweite ausfallen, abhängig vom Kontrast des Resistes.

Als konkretes Beispiel wurde eine Belichtungssequenz zur Erzeugung eines Blazeprofiles mit 2 μm Periode entwickelt. Für die Belichtung wurde eine binäre Maske mit eindimensionalen Strukturen mit 2 μm Periode und einem Öffnungsverhältnis* von $\frac{1}{4}$ verwendet. Die Gitterlinien sind parallel zur y-Achse orientiert. Mit jeder Verschiebung entlang der x-Achse wird eine angepasste Belichtungsdosis in den Photoresist eingebracht. Die Belichtungsserie setzte sich aus vier Belichtungen und folglich drei Verschiebungen zusammen. Die erste laterale Verschiebung betrug 250 nm und die zwei nachfolgenden 300 nm in x-Richtung.

* Das Öffnungsverhältnis beschreibt die Dimension der Chromaperturen (Öffnungen) im Verhältnis zur Periode.

Für die Belichtung wurde eine linienförmige IFP genutzt, die ein Winkelspektrum von $\pm 0,09^\circ$ und $\pm 3^\circ$ in x- bzw. y-Richtung generiert und die Formgebung der angestrebten Blazestruktur unterstützt. Die verschiedenen Belichtungsdosen lagen im Bereich zwischen $24,6 \text{ mJ/cm}^2$ und 45 mJ/cm^2 . Als Photoresist wurde der kommerziell erhältliche AZ 4562 (MicroChemicals GmbH) aufgrund seiner guten Grautoneigenschaften verwendet. Mittels Rotationsbeschichtung (engl. Spin-coating) wurde der Photoresist (AZ 4562:PGMEA* = 1:0.4) mit einer finalen Dicke von $2 \text{ }\mu\text{m}$ auf einen 4 Zoll Silizium-Wafer aufgebracht. Die belichtete Photoresiststruktur wurde anschließend im Entwickler mit verdünntem AZ 400K (H_2O : AZ 400K = 3:1) herausgelöst. Mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) wurde das Ergebnis der ersten Belichtungssequenz abschließend charakterisiert.

Ein Bruchkantenbild des entwickelten Blazeprofiles mit der gewünschten $2 \text{ }\mu\text{m}$ Periode ist in Abb. 18 (a) zu sehen. Bei dieser Struktur ergab sich ein sogenanntes „T-topping“. Diese Inhibierungsschicht (engl. (Surface) Inhibition layer) ergibt sich aus einer verminderten Entwicklungsrate an der Resistoerfläche. In der Literatur werden die Gründe hierfür mit verschiedenen Modellen erklärt [256]. Aufgrund dieser Inhibierungsschicht ergibt sich im Photoresistprofil ein Hinterschnitt. Vor allem für eine mögliche Replikation der Struktur z.B. mittels UV-Abformung, verursacht diese Eigenschaft Schwierigkeiten und führt oft zu Schäden des Abformwerkzeuges oder zu der Zerstörung der Struktur selbst.

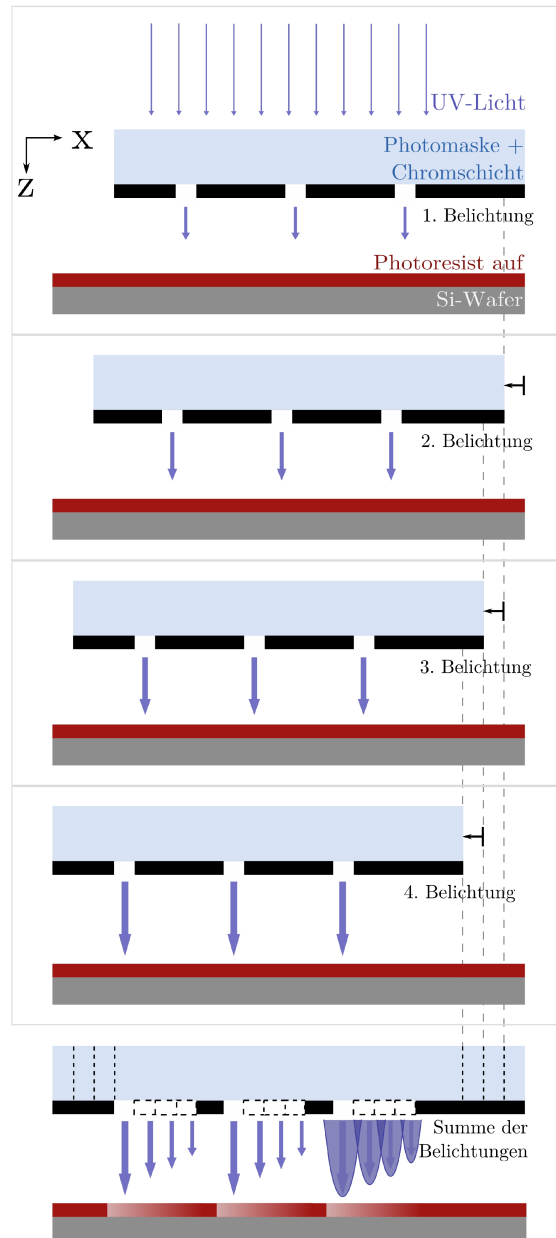


Abbildung 17: Schema einer eindimensionalen, lateralen Verschiebung der Photomaske am Beispiel einer 4-stufigen Belichtungssequenz.

* Propylenglykolmonomethylacetat bzw. 1-Methoxy-2-propyl-acetat wird als AZ EBR Solvent (MicroChemicals) vertrieben und ist ein Lösungsmittel zur Verdünnung von Fotolacken.

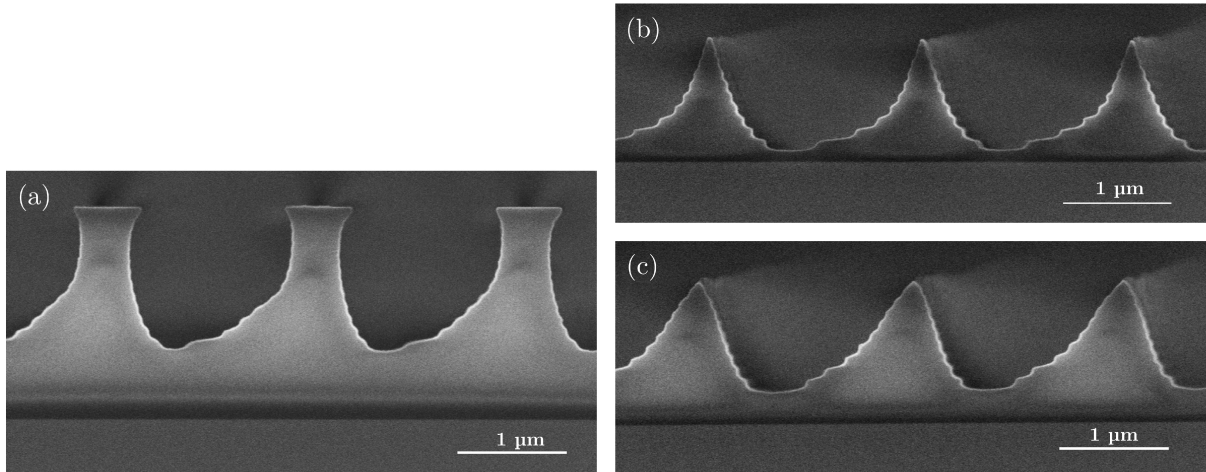


Abbildung 18: Blaze-Bruchkantenprofile in AZ 4562, die mittels lateraler Photomaskenverschiebung hergestellt wurden. Belichtungssequenzen in (a) + (b) mit vier und (c) mit sechs Teilbelichtungen. Alle Bruchkantenbilder wurden mittels REM erstellt.

Um diese Schicht zu entfernen, wurde die Belichtungsserie um eine zusätzliche Flutbelichtung mit einer Dosis von $17,8 \text{ mJ/cm}^2$ erweitert. Während einer Flutbelichtung wird das Substrat vollflächig ohne eine Photomaske belichtet. Das Ergebnis ist in Abb. 18 (b) zu sehen. Hierbei gelang die Entfernung der Inhibierungsschicht, wobei der Verlauf der Blaze flanken ebenfalls beeinflusst wurde.

In einer weiteren Variante wurde die Flutbelichtung durch zwei zusätzliche Belichtungsschritte mit angepasster Dosis ersetzt. Diese wurden zur ursprünglich genutzten Belichtungsreihe hinzugefügt, um die Inhibierungsschicht zu entfernen ohne die restliche Struktur mitzubelichten. Eine Übersicht über die vollständige Belichtungssequenz mit den einzelnen lateralen Verschiebungen und den Belichtungs Dosen zeigt die Abb. 19.

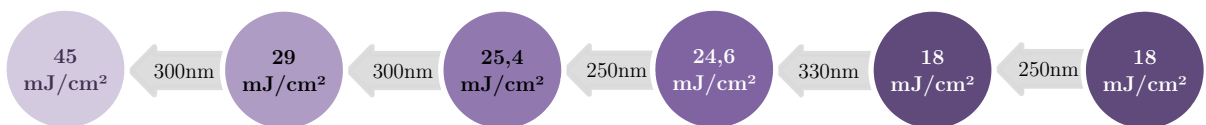


Abbildung 19: Belichtungssequenz für die in Abb. 18 (c) hergestellte Blaze-Struktur mit den jeweiligen Belichtungs Dosen (Kreise) und den dazwischen angewandten lateralen Verschiebungen in x (Pfeile). Der Sequenzstart erfolgte bei diesem Beispiel von rechts.

Das aus dieser Belichtungsreihe, bestehend aus sechs Teilbelichtungen, hervorgehende Resultat ist in Abb. 18 (c) zu sehen. Mit dieser Belichtungsreihe gelang qualitativ ein sehr gutes Blaze profil dieser experimentellen Versuche. Die gezielte Platzierung der zwei zusätzlichen Teilbelichtungen konnte die Inhibierungsschicht besser als die Flutbelichtung entfernen, ohne die Formgebung des Blaze profils zu sehr zu beeinträchtigen.

Die wellige Struktur (s. Abb. 18) des Photoresistes ist nicht auf die einzelnen Belichtungsstufen zurückzuführen. Teile des durch den Photoresist transmittierten Lichtes werden am Silizium-Wafer reflektiert und propagieren wieder in Richtung Photoresistoberfläche. Dabei interferiert dieser Teil des Lichts mit dem in den Photolack eindringenden Licht. Das dabei entstehende periodische Muster „stehender Wellen“ bildet sich in einer Art Rillenstruktur

im Photolack ab. Die Höhe d der einzelnen Stufen kann unter Verwendung des Zusammenhangs der konstruktiven Interferenz an dünnen Schichten über

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot n \quad (4.5)$$

ermittelt werden. Für die verwendete Wellenlänge (i-Linie) und einen typischen Brechungsindex von $n = 1,6$ für Photoresist ergibt sich eine Höhe dieser Stufen von $d = 114$ nm, welche der Stufenhöhe in den entwickelten Photoresiststrukturen in Abb. 18 entspricht. Mittels einer Antireflexionsschicht zwischen Substrat (Wafer) und Photoresist kann dieses Phänomen reduziert werden.

Anhand der erzeugten Blazestrukturen konnte die Herstellung eines kontinuierlichen Profils erfolgreich demonstriert werden. Weiterhin kann diese Technologie ebenfalls zur Variation der Strukturform und Strukturdichte eingesetzt werden. So können periodische Strukturen doppelt, drei- oder mehrfach überlagert werden. Die Periode einer Photomaske kann somit z.B. halbiert werden, wenn die Photomaske um die halbe Periode verschoben und ein zweites Mal belichtet wird. Darüber hinaus wäre z.B. auch die Herstellung schachbrettartiger oder hexagonaler Gitter, beispielsweise durch die Verschiebung einer Lochraaster-Photomaske, möglich. Solche Strukturen werden z.B. für zweidimensionale Lichtkoppelstrukturen eingesetzt, die die Effizienz der Lichtgewinnung von Emittlern erhöhen können [257, 258]. Unabhängig von neuen Strukturen kann der Photomaskenhalter zusätzlich auch zur Justage von Photomasken und Substrat verwendet werden.

Diese Technologie kann die Fähigkeiten eines Standard Mask Aligners auf einfache Art erweitern. Mit kosteneffektiven binären Photomasken können komplexere Profile, sowie verschiedene Variationen der originalen Photomaskenstruktur realisiert werden.

Auch wenn an dieser Stelle, die erfolgreiche Demonstration des verfahrenbaren Maskenhalters bereits gelungen ist, soll für die Vollständigkeit auf die optische Charakterisierung der Blazestruktur nicht verzichtet werden. An dieser Stelle soll allerdings angemerkt werden, dass sich die individuelle Gittergeometrie in der Regel aus den gegebenen Spezifikationen wie z.B. Einfallswinkel, Wellenlänge und Beugungsordnung ergibt und individuell optimiert wird.

Für eine Analyse der theoretischen Beugungseffizienzen in Transmission wurde das Strukturprofil aus Abb. 18 (c) in eine für Simulationen geeignete eindimensionale Gitterstruktur bestehend aus 100 Schichten überführt. Für eine erste Abschätzung wird eine identische Übertragung der Photoresiststruktur in Quarzglas mittels Proportionaltransfer [230, 259] oder, alternativ, in das glasähnliche Polymer OrmoComp [260] mittels UV-Abformung [78] angenommen.

In einer Vorbetrachtung wurde zunächst der theoretische optimale Einfallswinkel ermittelt, für die das Gitter die beste Effizienz in der 1. Beugungsordnung im visuellen Spektrum aufweist. Abbildung 20 zeigt die Abhängigkeit der relativen Beugungseffizienz der 1. Beugungsordnung von der Beleuchtungswellenlänge und dem Einfallswinkel, der im Bezug zur Gitternormalen und vom Übergang des Gittermediums in Luft angegeben ist.

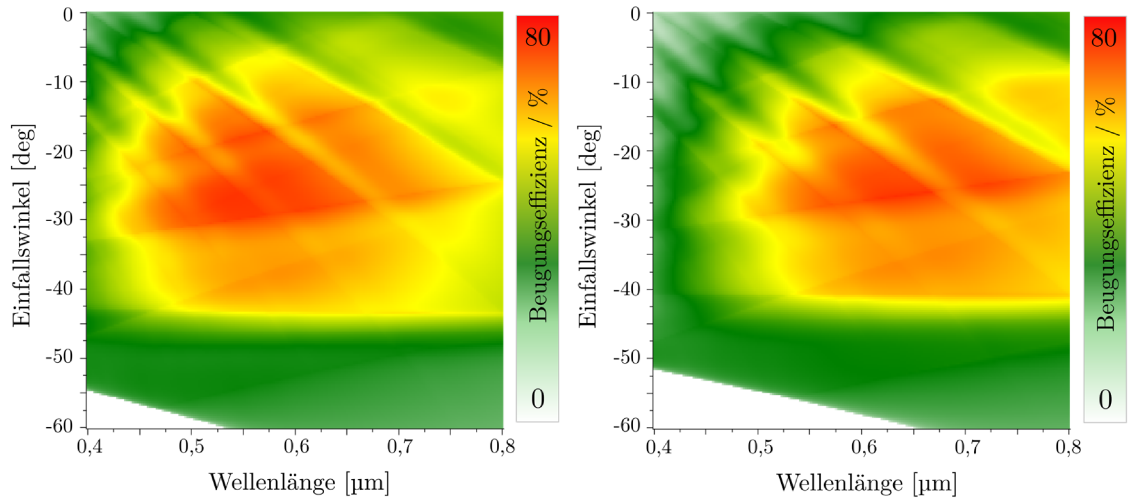


Abbildung 20: Simulierte Effizienzen der 1. Beugungsordnung der Struktur in Abb. 18 (c) unter Annahme einer identischen (a) Übertragung in Quarzglas oder (b) einer Abformung in OrmocComp in Abhängigkeit der Beleuchtungswellenlänge und des Einfallswinkels im Substrat (Übergang Glas zu Luft) für TE-polarisiertes Licht in Transmission.

Die Berechnungen in Abb. 20 zeigen, dass die höchsten Beugungseffizienzen in Transmission $>50\%$ für TE-polarisiertes Licht im visuellen Wellenlängenbereich ab 450 nm bis 800 nm für Einfallswinkel (im Substrat) zwischen ca. -27° bis -30° erreicht werden. Unter Verwendung des in Formel (4.2) gegebenen Zusammenhangs kann der Beleuchtungswinkel α_{inc} des Gitters bestimmt werden.

Für eine experimentelle Charakterisierung wurde die Blazestruktur aus Abb. 18 (c) mittels UV-Abformung in OrmoComp übertragen. Als Trägermaterial wurde ein Wafer aus Quarzglas verwendet. Anschließend wurde die Beugungseffizienz der Probe exemplarisch unter Verwendung einer Beleuchtungswellenlänge von 500 nm (TE-polarisiert) vermessen. Dabei ergab sich eine maximale gemessene Effizienz in der 1. Beugungsordnung von 61% für einen Einfallswinkel von $\alpha_{inc} = -40^\circ$. Verglichen mit den theoretisch ermittelten Werten stimmt das gut überein. Die geringe Abweichung kann verschiedene Gründe haben. Zum einen kann die Einstellung des Einfallswinkels Ungenauigkeiten beinhalten und zum anderen können Formabweichungen bei der Abformung zustande gekommen sein.

Aufgrund der Brechzahlabweichungen von Quarzglas und OrmoComp verschieben sich die maximal erreichbaren Beugungseffizienzen geringfügig in einen größeren Wellenlängenbereich für OrmoComp. So können Effizienzen größer 50% und maximal bis zu 75% in der 1. Beugungsordnung für TE-polarisiertes Licht im Wellenlängenbereich von ca. 500 nm – 800 nm unter einem Beleuchtungswinkel von $\alpha_{inc} = -44^\circ$ erreicht werden. Für diesen speziellen Beleuchtungswinkel zeigt Abb. 21 den wellenlängenabhängigen Verlauf der Beugungseffizienz in Transmission noch einmal detailliert für TE- sowie TM-polarisierte Beleuchtung.

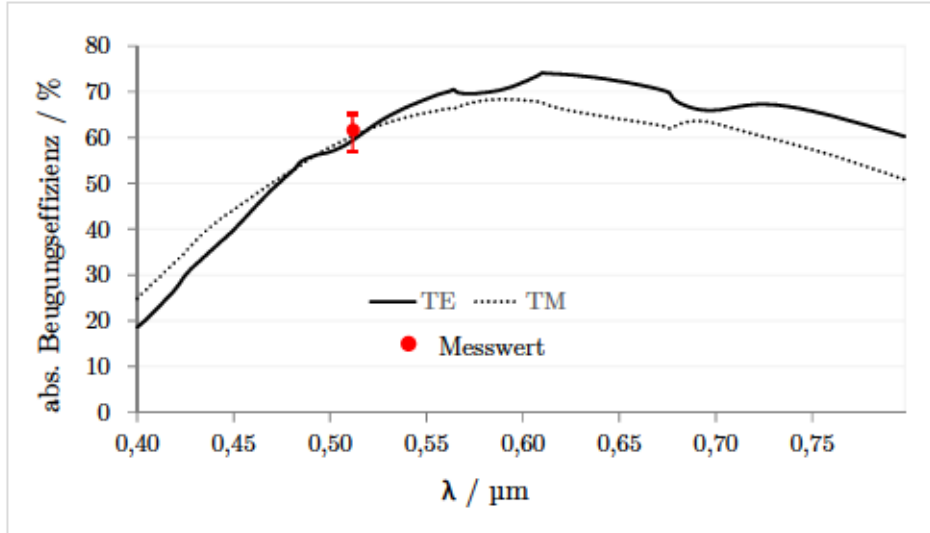


Abbildung 21: Transmissionseffizienz der 1. Beugungsordnung der in Abb. 18 (c) gezeigten Blazestruktur unter einem Beleuchtungswinkel von $\alpha_{\text{inc}} = -44^\circ$ unter Annahme einer identischen Übertragung in das glasähnliche Material OrmoComp.

Hierbei ist zu erwähnen, dass bisher noch keinerlei Optimierungen der Struktur bezüglich der Effizienz stattgefunden hat, da diese nicht Mittelpunkt dieser Arbeit sind. Dennoch kann allein mit der Wahl der Ätzparameter die Struktur selbst, wie auch die Strukturtiefe beeinflusst werden.

Ein Vergleich mit kommerziell erhältlichen Gittern ist an dieser Stelle schwierig, da normalerweise die Gittergeometrie abhängig von den individuellen und anwendungsbezogenen Spezifikationen optimiert wird, was hier so nicht stattgefunden hat, da die Struktur lediglich exemplarisch zur Demonstration der Technologie erzeugt wurde.

Die Herstellung geblazter Gitter mittels verfahrbarer Photomasken-Technologie hat einen markanten Nachteil. Die Generierung einer senkrechten Blaze-Rückflanke ist nicht ohne weiteres auf diese Art möglich. Eine Verringerung des Rückflankenwinkels ist allerdings für bestimmte Anwendung notwendig, speziell um die Effizienz zu erhöhen [34, 255, 261].

Wie bereits für periodische Strukturen binärer Form bieten an dieser Stelle rigoros-optimierte Photomasken das Potenzial, individuelle Intensitätsverteilungen im Luftbild für bestimmte Proximity-Abstände zu erzeugen. Im Gegensatz zu der vorangegangenen Technologie unter Verwendung binärer Photomasken, bedarf es bei dieser Variante allerdings einer aufwändigeren und somit kostenintensiveren Fertigung der Photomaske.

4.1.2 Rigoros-optimierte Phasenmaske zur Erzeugung kontinuierlicher Profile

Wie im Abschnitt zuvor diskutiert, ist die Herstellung einer senkrechten Blaze-Rückflanke fertigungstechnisch nicht einfach, aber für bestimmte Applikationen zur Optimierung von Beugungseffizienzen notwendig. Das folgende Beispiel soll ähnlich dem vorausgegangenen Beispiel zur Demonstration der Photomaskentechnologie dienen, wurde aber ebenfalls nicht konkret für eine Anwendung optimiert.

Abbildung 22 (a) zeigt ein mögliches Modell für ein Blazeprofil, welches unter schrägem Lichteinfall Beugungseffizienzen $>60\%$ z.B. in der -10. transmittierenden Beugungsordnung für Wellenlängen im visuellen Spektrum (VIS) erzeugt. Aber auch die benachbarten Beugungsordnungen (-9. & -11.) haben ähnlich gute Beugungseffizienzen nur für leicht verschobene Wellenlängenbereiche (s. Abb. 22 (b)). Die Beugungseffizienzen sind gering polarisationsabhängig. Für TM und TE polarisiertes Licht können verschiedene Effizienzen erreicht werden, wie in Abb. 22 (b) dargestellt. Das Modell in Abb. 22 (a) beinhaltet bereits herstellungsbedingte Eigenschaften, wie z.B. das untere Plateau zwischen den einzelnen „Sägezähnen“, sowie das Plateau anstelle einer perfekten Blaze-Spitze. Basierend auf Erfahrungen ist eine perfekte Spitze herstellungsbedingt schwer zu erreichen. Abhängig von dem zu realisierenden Blazewinkel α_B entsteht ebenfalls ein schwierig herzustellender spitzer Winkel am Boden zwischen den „Sägezähnen“, der meist in einem kleinen Plateau zwischen den Sägezähnen resultiert.

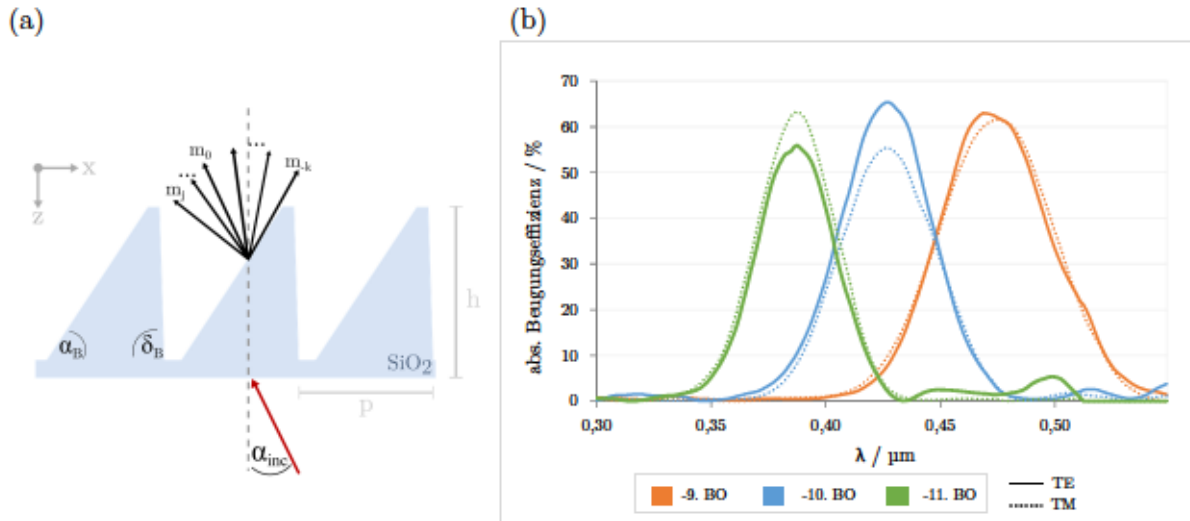


Abbildung 22: (a) Blaze-Modell in Transmission mit einem Blazewinkel $\alpha_B = 59^\circ$ und einem Rückflankenwinkel $\delta_B = 88,5^\circ$. (b) Simulation der Beugungseffizienz der -9., -10. & -11. Beugungsordnung (BO) einer Blazestruktur gemäß (a) mit $p = 3 \mu\text{m}$ und $h = 3,5 \mu\text{m}$ mit einem Einfallswinkel $\alpha_{\text{inc}} = 62,2^\circ$ im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 550 nm.

Neben der Nutzung im visuellen Spektrum, bietet das Gitterdesign in Abb. 22 (a) ebenfalls Potential für Anwendungen im nahen Infrarotbereich (NIR ca. 750 – 2500 nm). In der 1. BO können Effizienzen von $>83\%$ für einen Wellenlängenbereich von 1,8 – 2,2 μm erreicht werden, wie Abb. 23 zeigt. Gitter dieser Art bieten die Möglichkeit z.B. für verschiedene spektrale Bereiche gleichzeitig verwendet zu werden.

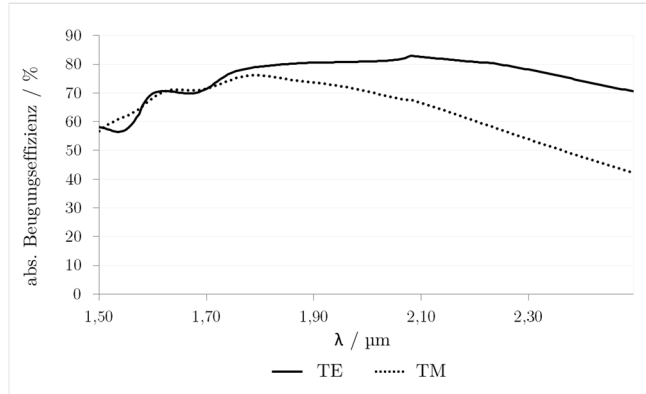


Abbildung 23: Simulation der Beugungseffizienz der 1. BO im NIR der in Abb. 22 (a) dargestellten Blazestruktur für einen Einfallswinkel von $\alpha_{\text{inc}} = 2,9^\circ$.

Für die Herstellung einer Struktur mittels Mask Aligner Lithografie, wie in Abb. 22 (a) dargestellt, wird eine angepasste Belichtungsverteilung in der Luftbildebene benötigt. So wäre z.B. eine schräge Propagation von Photomaske zum Substrat hilfreich, um eine senkrechte Blazestruktur zu generieren. Zur Erzeugung von Luftbildern mit maßgeschneiderter Intensitätsverteilungen ist eine speziell gerechnete Photomaske notwendig.

Für die Herstellung periodischer binärer Strukturen konnte der Einsatz rigoros-optimierter Photomasken zur Erzeugung hoch aufgelöster periodischer Strukturen bereits erfolgreich demonstriert werden [9, 226]. In [226] präsentieren Stürzebecher et al. theoretische Berechnungen zu einer dreistufigen Photomaske, die ein schräg propagierendes Lichtfeld generiert und damit eine charakteristische Blazestruktur mit senkrechter Rückflanke erzeugen könnte. Allerdings beinhaltet diese Veröffentlichung keine weiteren experimentellen Ergebnisse, die nun an dieser Stelle vorgestellt werden sollen. Abbildung 24 zeigt das Prinzip dieser theoretisch entwickelten Photomaske anhand einer simulierten Propagation entlang der Ausbreitungsrichtung z. In einem Proximity-Abstand von 50 µm ergibt sich für das schräg propagierende Lichtfeld eine nutzbare Schärfentiefe von ca. 5 µm.

Unter Verwendung dieser Photomaske konnten nun erfolgreich Blazeprofile mit senkrechter Rückflanke experimentell realisiert werden. Derartige Strukturen können z.B. für Echelle Spektrographen als Echelle-Gitter oder auch als Querzerleger-Gitter* (engl. Cross-disperser) fungieren [262 - 264].

Für die Realisierung einer Struktur, wie in Abb. 22 (a) skizziert, erfolgte zunächst eine

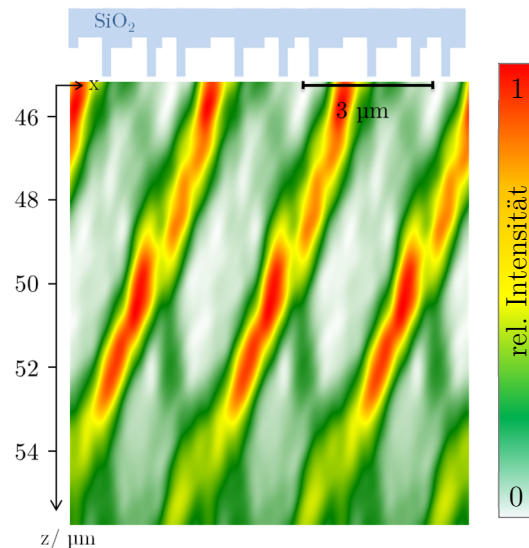


Abbildung 24: Rigoros optimierte 3-Level Phasenmaske zur Erzeugung einer kontinuierlichen Blazestruktur unter Verwendung eines schräg propagierenden Lichtfeldes [226].

* Ein Querzerleger-Gitter, engl. cross disperser oder cross-dispersing grating, wird oft in Verbindung mit einem Echelle-Gitter verwendet. Einzelne Ordnungen des Echelle-Gitters werden voneinander getrennt und untereinander angeordnet, wodurch Analysen vereinfacht werden können.

Strukturierung in 4 μm dicken Photoresist auf einem Silizium-Wafer. Hierfür wurde der Photoresist Typ AZ ECI3027 (MicroChemicals GmbH) aufgrund des hohen Kontrastes und somit dem Potenzial zur Generierung steiler Seitenwände mit hohen Aspektverhältnissen ausgewählt.

Vor der Belichtung wurde der aufgeschleuderte Photoresist für $t = 60$ s bei 100°C zur Verringerung der Restlösemittelkonzentration getempert (Softbake) [137].

Im Gegensatz zum vorangegangenen Abschnitt wurde für diese Belichtung ein anderes Belichtungsregime verwendet, um die gewünschte Intensitätsverteilung zur Erzeugung der Blazestruktur mittels spezieller IFP zu optimieren. Das dafür genutzte dreieckförmige Winkelspektrum mit $v_x = +0,43^\circ$ und $v_y = \pm 0,52^\circ$ ist in Abb. 25 dargestellt. Dabei ergibt die Integration über die y-Richtung eine sägezahnartige Belichtungsdosis innerhalb einer Gitterperiode.

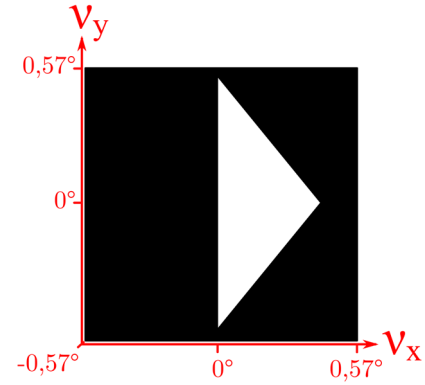


Abbildung 25: IFP-Design zur Definition des Winkelspektrums der Photomaskenbeleuchtung.

Die Belichtung erfolgte mit einer Dosis von 114 mJ/cm^2 bei einem Proximity-Abstand von $d = 49 \text{ }\mu\text{m}$. Nach einem erneuten Tempersschritt (engl. Post-Exposure-Bake, PEB) von 60 s bei 120°C wurde die Struktur für 2,5 min in AZ 726 MIF entwickelt. Abbildung 26 (a) zeigt das entwickelte Photoresistprofil der Blazestruktur mit einer Periode von $3 \text{ }\mu\text{m}$ und einer Höhe von $h = 3,5 \text{ }\mu\text{m}$.

Auf den ersten Blick scheinen die entwickelte Struktur in Photoresist (Abb. 26 (a)) und das Modell in Abb. 22 in der Geometrie sehr ähnlich zu sein. Daher sind ähnliche Effizienzen wie im Modell zu erwarten, wobei die Analyse zunächst auf Wellenlängen im VIS Spektrum beschränkt wurde.

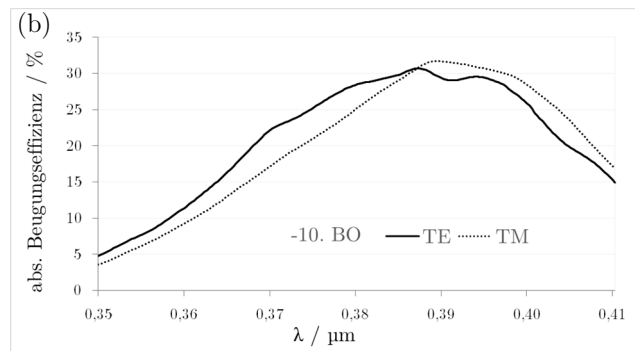
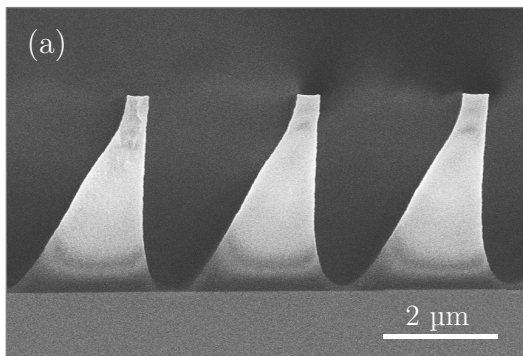


Abbildung 26: (a) Entwickelte Blazestruktur in AZ ECI3027 mit $p = 3 \text{ }\mu\text{m}$ und $h = 3,5 \text{ }\mu\text{m}$ unter Verwendung der rigoros-optimierten Phasenmaske in Abb. 24. (b) Simulierte Beugungseffizienz der -10. Beugungsordnung bei einem Einfallswinkel $\alpha_{\text{inc}} = 47,3^\circ$.

Für eine theoretische Betrachtung, sowie quantitative Abschätzung der transmittierenden Beugungseffizienzen der hergestellten Struktur wurde das Bruchkantenprofil der REM-Aufnahme in Abb. 26 (a) in ein identisches, simuliertes Quarzglasgitterprofil überführt. Dafür wurde die Gitterstruktur aus 124 Schichten verschiedener Dicken approximiert. Die Simulationen mittels RCWA (Abb. 26 (b)) ergaben allerdings einen signifikanten Abfall der Beugungseffizienzen im

Vergleich zu den erwarteten Werten der Modellstruktur. So hat die -10. Beugungsordnung nur noch eine maximale Effizienz von 31%.

Bei einer genauen Betrachtung der Struktur in Photoresist erkennt man einen leichten Hinterschnitt der Rückflanke. Überträgt man diesen Hinterschnitt auf das Modell und nimmt einen Rückflankenwinkel von $\delta_B = 91,5^\circ$ bei der Struktur in Abb. 22 (a) an, sinken die Effizienzen in den Ordnungen bereits um 20%. Somit lässt sich der Abfall der Beugungseffizienzen in den erwarteten Beugungsordnungen gemäß dem Blaze-Modell erklären und auf den Hinterschnitt, bzw. auf den Rückflankenwinkel zurückführen.

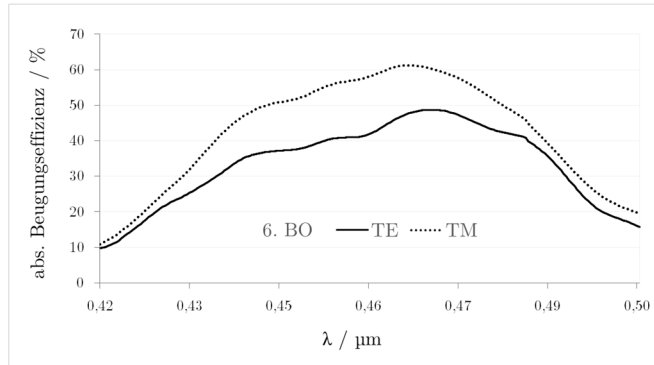


Abbildung 27: Die besten Beugungseffizienzen werden unter einem Beleuchtungswinkel von $\alpha_{\text{inc}} = -7,4^\circ$ in der 6. Beugungsordnung für TM polarisiertes Licht erreicht.

Da sich im Vergleich zu der Modellstruktur die Form der Photoresiststruktur, wenn auch nur gering, verändert hat, haben sich auch die Effizienzen in den Beugungsordnungen verschoben. Weitere Simulation ergaben eine maximale Effizienz von ca. 61% in der 6. Beugungsordnung (Abb. 27) für Wellenlängen vergleichbar zum Modellbeispiel in Abb. 22 (b), aufgrund des Rückflankenwinkels jetzt jedoch für einen Einfallswinkel von $-7,4^\circ$. Da die Simulationen hinreichend gute Ergebnisse der Beugungseffizienzen ergaben, bestand die folgende Zielsetzung in der praktischen Übertragung der Photoresiststruktur ins Quarzglas mittels reaktivem Ionenätzen (engl. Reactive-ion etching, RIE) [230, 265]. Mit zusätzlichen Experimenten gelang es, den Prozess weiterzuentwickeln und zu optimieren, sodass das Blazeprofil mehrmals identisch reproduziert werden konnte. Für eine genaue Kenntnis über die zu übertragene Photoresiststruktur, ohne den Wafer für eine Bruchanalyse und somit für fortführende Experimente zu zerstören, wurde eine Untersuchung mittels FIB und REM durchgeführt. Innerhalb einer kleinen Fläche von etwa $225 \mu\text{m}^2$ wurde mit Hilfe des Ionenstrahls ein Querschnitt auf der Probe erzeugt und anschließend ein Bild mittels REM aufgenommen. Die Aufnahme des Querschnitts der Photoresiststruktur ist in Abb. 28 zu sehen.

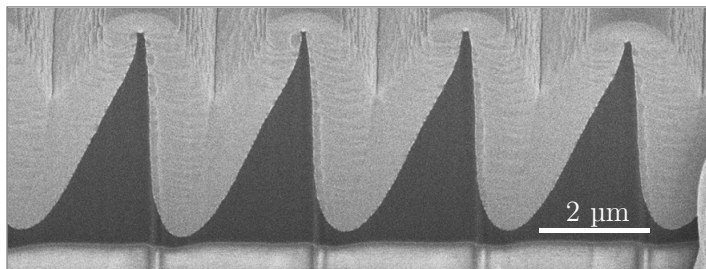


Abbildung 28: Charakterisierung der Struktur in AZ ECI3027 (dunkle Bereiche) mittels FIB. Zur Sicherung der Stabilität der Strukturen wurde die Photoresiststruktur mit Platin in Schnittbereich aufgefüllt (heller Bereich).

Die Kontrolle der Resiststruktur ergab, wie erwartet, ein qualitativ gutes Blazeprofil mit ca. $3,5\ \mu\text{m}$ Tiefe und fast senkrechter Rückflanke. Damit sind sehr gute Bedingungen für den anschließenden Proportionalätzprozess erfüllt.

Mittels einer Variationen des Gasdruckes sowie des Verhältnisses des Gasgemisches ($\text{CF}_4:\text{C}_4\text{F}_8$) des Ätzprozesses [40, 265] konnte die Struktur in zwei Versuchen zum einen mit einer Tiefe von ca. $h = 5,5\ \mu\text{m}$ und zum anderen mit etwa $h = 4,9\ \mu\text{m}$ ins Quarzglas übertragen werden. Eine erneute Profilanalyse mittels FIB und REM gab Aufschluss über die resultierenden Strukturen in SiO_2 (s. Abb. 29). Verglichen mit der ursprünglich angestrebten Tiefe von $3 - 4\ \mu\text{m}$, um in der Größenordnung der Periode zu bleiben, ist die Struktur um bis zu 50% tiefer geworden. Dies hat natürlich auch Auswirkungen auf die erwarteten Beugungseffizienzen.

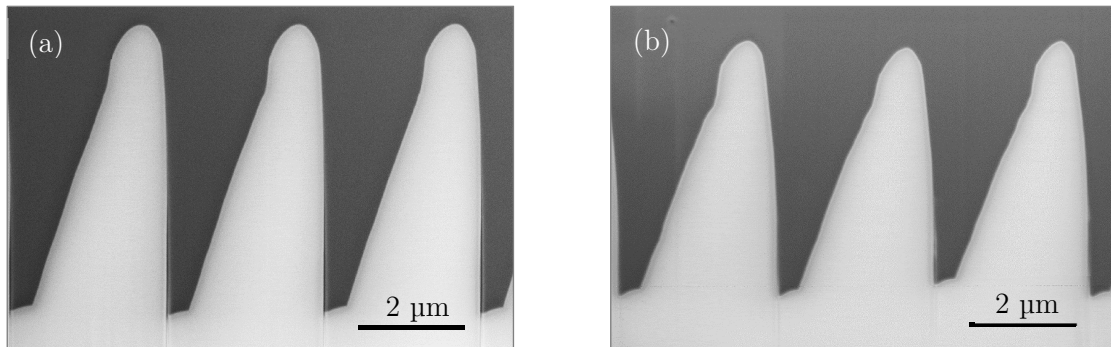


Abbildung 29: FIB-Charakterisierung der unterschiedlich tief geätzten Blazestrukturen in Quarzglas (helle Strukturen) mittels RIE: (a) $h = 5,5\ \mu\text{m}$ und (b) $h = 4,9\ \mu\text{m}$.

Auch nach dem Transfer in Quarzglas konnte eine senkrechte Rückflanke der Blazestruktur nahezu erhalten bleiben.

Für eine theoretische Auswertung der Beugungseffizienzen der Strukturen in Abb. 29 wurde auf Basis der aufgenommenen Bilder das Profil jeweils erneut in eine simulierte Gitterstruktur bestehend aus 120 Schichten überführt. Damit konnten anschließend die Beugungseffizienzen der Blazegitter in Quarzglas mittels RCWA quantitativ ermittelt werden. Die Simulationen ergaben verschiedene interessante Ergebnisse.

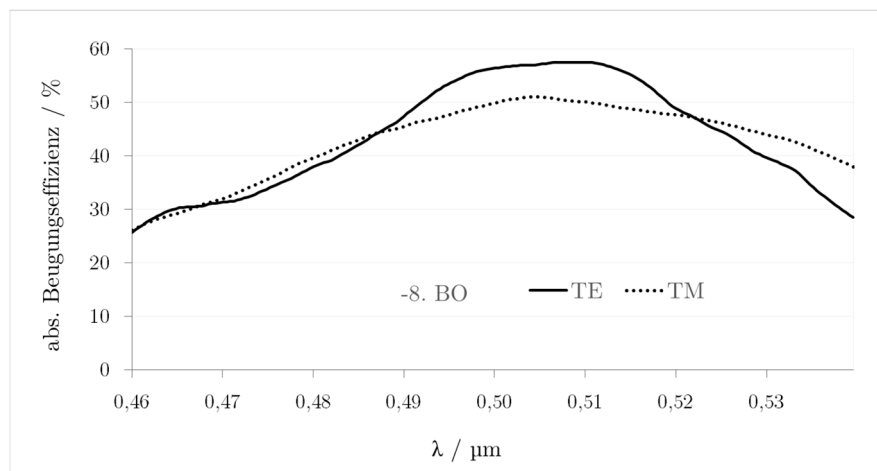


Abbildung 30: Theoretisch ermittelte Beugungseffizienzen der tiefgeätzten Blazestruktur in Abb. 29 (a). Maximale Beugungseffizienzen können für TE polarisiertes Licht unter einem Beleuchtungswinkel $\alpha_{\text{inc}} = 74,7^\circ$ in der -8. Beugungsordnung erreicht werden.

Die Blazestruktur mit $5,5\ \mu\text{m}$ Tiefe in Abb. 29 (a) zeigt gute Beugungseffizienzen in der -8. Beugungsordnung im visuellen Bereich für Beleuchtungswellenlängen bei $510\ \text{nm}$ (s. Abb. 30) unter einem Beleuchtungswinkel von $\alpha_{\text{inc}} = 74,7^\circ$. Allerdings können maximal nur Effizienzen von $57,5\%$ erreicht werden. Dieses Ergebnis entspricht den ungefähren Erwartungen, die sich aus den vorherigen Betrachtungen ergeben haben. Da die in Quarzglas geätzte Struktur keinen Hinterschnitt mehr besitzt, ergeben sich die maximalen Effizienzen in den Beugungsordnungen wie im ursprünglichen Modell angenommen. Dass die Effizienzen allerdings nicht denen des Modells in Abb. 22 entsprechen, ist auf die Abweichungen der Strukturform, speziell an den Spitzen, zurückzuführen.

Abschließend wurde auch die Beugungseffizienz für Beleuchtungswellenlängen im NIR (Nahes Infrarot ca. $750 - 2500\ \text{nm}$) untersucht, die eingangs bereits theoretisch betrachtet wurde. Durch die abweichende hergestellte Gittergeometrie im Vergleich zum ursprünglichen Blazemodell in Abb. 22, ergibt sich ein leicht veränderter Beleuchtungswinkel für maximale Effizienzen in der 1. Beugungsordnung. Für eine TE-polarisierte Beleuchtung mit einem Beleuchtungswinkel von $\alpha_{\text{inc}} = -10,3^\circ$ können sehr gute Beugungseffizienzen in der 1. Beugungsordnung im NIR erreicht werden, wie in Abb. 31 dargestellt.

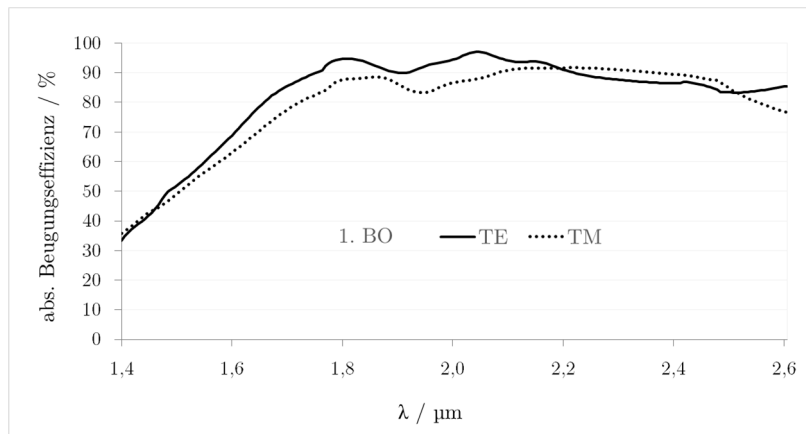


Abbildung 31: Simulierte Beugungseffizienz der Struktur in Abb. 29 (a) für die 1. Beugungsordnung mit einem Einfallswinkel von $\alpha_{\text{inc}} = -10,3^\circ$.

Die in Abb. 29 (a) hergestellte Blazestruktur erzeugt Beugungseffizienzen $\eta_{\text{T}} > 90\%$ (max. 97%) für eine relativ breitbandige Beleuchtung im NIR.

Die in SiO_2 übertragenden Strukturen können auf verschiedene Weisen und je nach Anwendungsspezifikation noch optimiert werden, um maximale Effizienzen für gewünschte Wellenlängenbereiche zu generieren. Dazu zählt neben der Optimierung des Ätzprozesses auch die Nutzung verschiedener Beschichtungen und Materialien. An dieser Stelle soll aber eine Optimierung nicht weiter verfolgt werden, da der Schwerpunkt auf der prinzipiellen Erzeugung einer senkrechten Rückflanke der Blazestruktur lag, was im Photoresist und mit anschließender Übertragung ins Quarzglas erfolgreich gezeigt werden konnte.

Da das Gitter nicht explizit für eine bestimmte Konfiguration optimiert wurde, können die erreichten Effizienzen nicht ohne weiteres mit denen kommerziell erhältlicher Gitter verglichen werden. Gitter ähnlicher Geometrien zur Anwendung im NIR findet man z.B. bei der Firma Ibsen Photonics [266, 267].

Die Herstellung der Blazestruktur mittels rigoros optimierter Photomaske ist eine sehr genaue sowie reproduzierbare Methode und ermöglicht Strukturen sehr hoher Qualität. Nichtsdestotrotz ist diese Art Photomasken in der Fertigung, vor allem im Vergleich zu dem damit herzustellenden Element, oft aufwändig und folglich mit hohen Kosten verbunden. Der Einsatz der Photomaske mittels Proximitylithografie erlaubt allerdings eine sehr lange Standzeit und kann zur Fertigung sehr hoher Stückzahlen verwendet werden, wodurch sich die Herstellungskosten relativieren.

4.2 Erzeugung isolierter, aperiodischer Strukturen

Bisher lag der Fokus der Arbeit auf der Erzeugung periodischer Strukturen. Daneben sind nicht-periodische Strukturen ebenfalls von großer Bedeutung.

Die erreichbare Auflösung nicht-periodischer Strukturen wird durch das Prinzip des Schattenwurfs stark limitiert, da weder der Talbot Effekt noch die Nahfeldholografie verwendet werden können, um die Auflösung zu verbessern. Die Platzierung von OPC Strukturen spielt stattdessen eine zentrale Rolle für die Kompensierung von Beugungseffekten. Bisher wurden nur Photomaskendesigns vorgestellt, die entweder auf konventioneller, einfacher Strukturierung der Chromschicht für binäre Amplitudenmasken basierten, oder reine Phasenmasken waren. Mit einer Kombination beider werden neue Freiheitsgrade für die Strukturierung ermöglicht und es bieten sich neue Ansätze für die Realisierung nicht-periodischer hoch aufgelöster Strukturen mittels Mask Aligner Lithografie.

Bühling et al. [268] haben ein Design für eine komplexe Photomaske mit vier Höhenstufen im Quarzglas für eine Phasen- und eine zusätzliche Chromschicht zur Amplitudenmodulierung entwickelt. Dabei gelang es ihnen, in einem 50 μm Proximity-Abstand eine 3 μm Auflösung zu erreichen. In diesem Abstand ist konventionell, lt. Formel (3.1), eine Auflösung von ca. 4,3 μm mit einer i-Linien Beleuchtung möglich. In Anbetracht der aufwändigen Photomaske gelang somit nur eine geringe Verbesserung.

In einer anderen Arbeit konnten Cirino et al. [269] eine Auflösung von 1,5 μm Linienbreite, ebenfalls mit einem 50 μm Abstand zur Photomaske, realisieren. Die verwendete Photomaske war mit einer dünnen gehärteten, amorphen Kohlenstoffschicht bedeckt, die als Amplitudenmodulierung fungierte. Ein zusätzliches Profil mit verschiedenen Tiefen im Quarzglassubstrat diente einer ergänzenden Phasenmodulierung.

Mittlerweile wurde die Technologie des Mask Aligners weiter entwickelt und die mechanische sowie optische Funktionalität verbessert, wie sie unter Abschnitt 3.3 beschrieben wurde. Damit können verschiedene z.B. auflösungsverbessernde Ansätze basierend auf unterschiedlichen Photomaskentechnologien besser adressiert und realisiert werden. Darüber hinaus können mit weiterentwickelten Simulationsmöglichkeiten Belichtungen bereits im Vorfeld optimiert werden. Dazu zählt zum Beispiel die Simulation von individuellen Winkelspektren der Photomaskenbeleuchtung.

Wird eine konventionelle Photomaske, wie in Abb. 32 (a), belichtet, so werden Teile des Lichtes an der Chromschicht reflektiert sowie teilweise absorbiert oder transmittieren durch die Maske an den jeweiligen Chromöffnungen. Je kleiner die Dimensionen der Maskenöffnungen werden, um stärker wird das elektrische Feld E_{Maske} während der Propagation zum Wafer von Beugungs- und Interferenzeffekten geprägt. Folglich wird die Lichtverteilung I_{Wafer} des Luftbildes auf dem Wafer beeinflusst und dabei werden Bereiche belichtet, die nicht belichtet werden sollen. In Abb. 32 (a) spiegelt sich dies in einem Kontrastverlust der resultierenden Intensitätsverteilung I_{Wafer} in der Waferebene wieder.

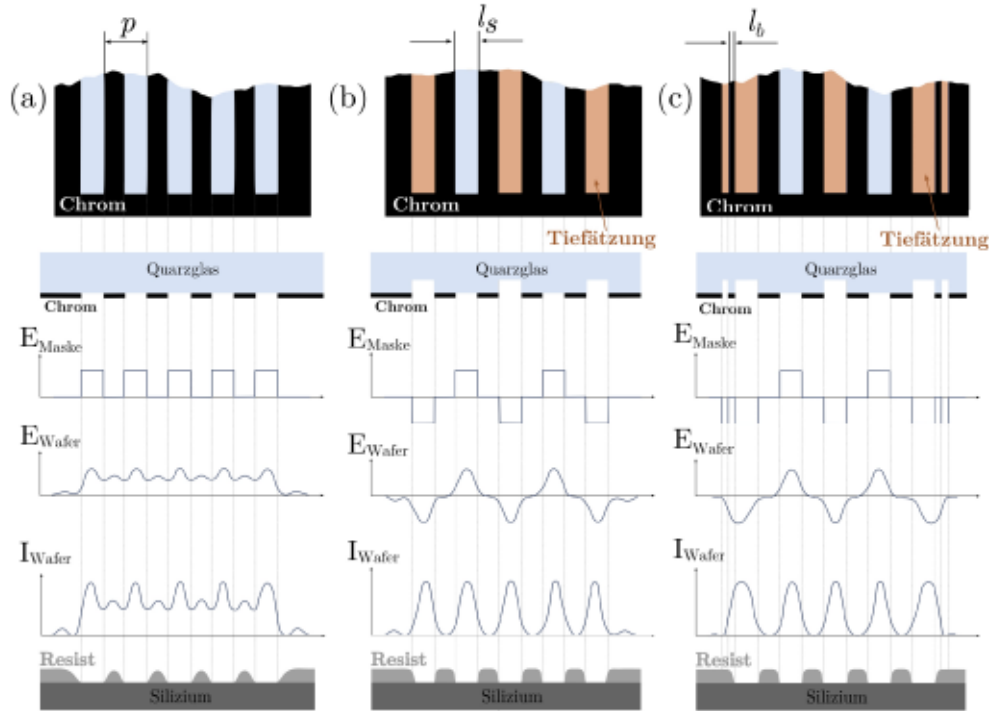


Abbildung 32: (a) Binäre Amplituden-Photomaske, (b) eine AAPSM und (c) eine AAPSM mit zusätzlichen OPC Strukturen. Schwarz entspricht Chromschicht, die blauen Bereiche entsprechen den einfachen Chromöffnungen und die roten denen zusätzlicher tiefgeätzter Bereiche in SiO_2 .

Ein alternierendes Phasenmaskendesign (engl. Alternating aperture phase-shifting mask, AAPSM), wie in Abb. 32 (b) oder (c), ermöglicht das gezielte Nutzen von destruktiver Interferenz benachbarter Linien, bzw. Maskenöffnungen. Eine Phasenschiebung kann durch eine gezielte Strukturierung des Photomaskenprofils erreicht werden.

Licht, welches die tiefgeätzten Bereiche in der Photomaske passiert (rot), erfährt eine andere optische Weglänge, als das elektrische Feld, welches die einfachen Chromöffnungen (blau) passiert. Um eine Phasenschiebung von $\varphi = \pi$, wie in Abb. 32 (b), zu erzeugen, kann die notwendige Ätztiefe der Gräben mit dem Zusammenhang

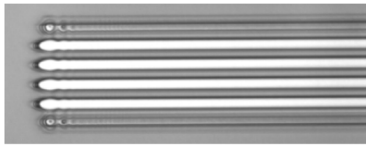
$$d_{PS}(\varphi) = \frac{\varphi \cdot \lambda}{2\pi \cdot (n_{\text{Glas}} - n_{\text{Luft}})} \quad (4.6)$$

berechnet werden. Diese Formel ist allgemeingültig, nicht nur für $\varphi = \pi$. Für eine i-Linien Beleuchtung ($\lambda = 365 \text{ nm}$) ergibt sich eine Ätztiefe von $d_{PS} = 385 \text{ nm}$ für eine Quarzglas Photomaske ($n = 1,47$).

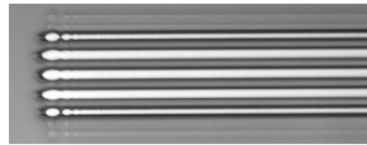
Die destruktive Interferenz zwischen den benachbarten Maskenöffnungen wirkt sich auf die Intensitätsverteilung des Luftbildes aus und erhöht die räumliche Auflösung und den Kontrast [270]. Zusätzliche OPC Strukturen, wie z.B. so genannte „scattering bars“, wie in Abb. 32 (c) veranschaulicht, können genutzt werden, um die Intensitätsverteilung des Luftbildes weiterhin zu korrigieren, um somit die Breite und die Position äußerer Linien zu verbessern.

Die Methode einer AAPSM wurde genutzt, um eine isolierte Struktur, bestehend aus fünf Linien mit einer Linienbreite von $l_s = 2 \mu\text{m}$ und lokaler Periode von $p = 4 \mu\text{m}$ in $1 \mu\text{m}$ dickem Resist (AZ 1512) herzustellen. Dafür wurden entsprechende Photomaskendesigns analog der in Abb. 32 dargestellten Prinzipien entworfen und in einem Proximity-Abstand von $d = 30 \mu\text{m}$ belichtet. Die Ergebnisse der entwickelten Photoresiststrukturen sind in Abb. 33 dargestellt.

(a) Binäre Amplitudenmaske



(b) AAPSM



(c) AAPSM + OPC

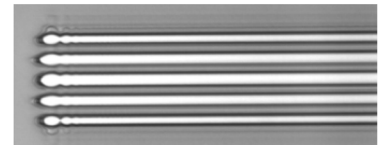


Abbildung 33: Mikroskopaufnahmen der Photoresiststrukturen, die analog mit der in Abb. 32 definierten Photomaskenlayouts ($l_s = 2 \mu\text{m}$ und $p = 4 \mu\text{m}$) hergestellt wurden. Der verwendete Proximity-Abstand betrug $d = 30 \mu\text{m}$.

Dieses Beispiel zeigt anschaulich die Limitation einer konventionellen Amplituden-Photomaske. Interferenz- und Beugungseffekte bewirken, dass in einem Proximity-Abstand von $30 \mu\text{m}$ statt der fünf Linien, nur vier Linien vollständig in den Photoresist übertragen wurden, wie es das Ergebnis der Mikroskopaufnahme in Abb. 33 (a) zeigt.

Unter Verwendung der AAPSM konnten alle 5 Linien adäquat in Photoresist aufgelöst werden (Abb. 33 (b)). Die Breite und die Position der äußersten Linien konnte mittels hinzugefügter OPC korrigiert werden. Die zusätzliche äußere OPC-Linie hat eine Breite und einen Abstand l_b zur äußersten Maskenöffnung der Struktur von 600 nm . Abbildung 33 (c) zeigt das deutlich verbesserte Ergebnis der Photoresiststruktur. Die Position sowie die Breite der OPC Struktur wurde mittels Simulationen im Vorfeld optimiert. Hierfür wurde das Beugungsbild ausgehend von der Photomaske für eine Propagationslänge von $z = 30 \mu\text{m}$ simuliert. Abbildung 34 zeigt die Auswertung aller drei Photomaskentypen und mit einem variierten Abstand der OPC zur äußeren Maskenöffnung der eigentlichen Struktur. Die Auswertung zeigt einen zusätzlichen Querschnitt der Intensitätsverteilung (I_{Wafer}) in einem Proximity-Abstand von $30 \mu\text{m}$.

Abbildung 34 (c) und (d) zeigen zwei Beispiele für mögliche OPC Konfigurationen. Erst mit einer Verringerung des Abstandes l_b von 1600 nm (Abb. 34 (c)) auf 600 nm (Abb. 34 (d)) verstärkt sich der Einfluss dieser „scattering bar“ auf die Intensität der äußersten Linien. Abgesehen von der mittleren Linie haben die vier anderen Linien in Abb. 34 (d) annähernd dieselbe Intensität. Gleichzeitig konnte die Position der äußeren Intensitätsmaxima wie gewünscht nach außen korrigiert werden. Abbildung 34 zeigt noch einmal zusammenfassend und anschaulich die Herausbildung der konkreten Intensitätsverteilung des Luftbildes in einer

Entfernung von 30 μm hinter der Photomaske und somit, warum z.B. nur vier statt fünf Linien mittels einer binären Photomaske in Resist übertragen werden können.

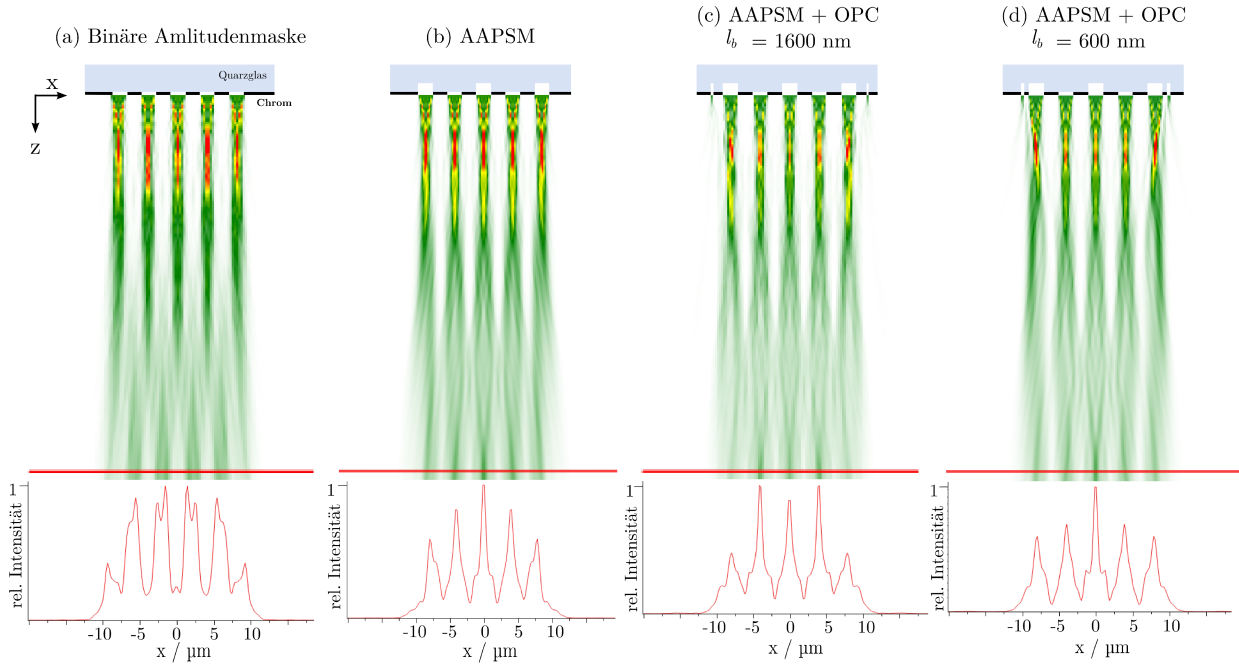


Abbildung 34: Simulierte Beugungsbilder unter Annahme kollimierter Beleuchtung für verschiedene Photomasken: (a) binären Amplitudenmaske, (b) AAPSM, (c)+(d) AAPSM mit OPC. Bild (c) und (d) unterscheiden sich in dem Abstand l_b der OPC Struktur zur äußersten Strukturlinie. Die rote Linie bei $z = 30 \mu\text{m}$ definiert den Ort des gezeigten Intensitätsquerschnitts.

Im Folgenden soll eine Übertragung dieser Methodik auf komplexere Strukturen ähnlicher Geometrie diskutiert werden. Die bisher mögliche eindimensionale Betrachtung soll insbesondere auf eine zweidimensionale Problematik einer L-Struktur erweitert werden. Dafür werden fünf L-förmige Linien mit 2 μm Breite und 4 μm lokalem Abstand zueinander angeordnet, sodass sich die in Abb. 35 gezeigte Form mit den dazugehörigen Abmaßen ergibt.

Das einfache Ergänzen einer alternierenden Phasenverschiebung, wie sie in Abb. 36 (a) dargestellt ist, reicht hier nicht aus, um diese komplexere Struktur adäquat in Photoresist, unter Verwendung eines Proximity-Abstandes von 30 μm , zu übertragen. Bereits die nicht akzeptable simulierte Intensitätsverteilung des Luftbildes (Abb. 36 (b)) lässt die Schwierigkeiten erkennen. Das experimentelle Ergebnis in Abb. 36 (c) zeigt lediglich zwei statt fünf aufgelöste Linien in Photoresist. Insbesondere die Strukturierung der isolierten, verlängerten mittleren Linie kann nicht durch eine einfache Phasenänderung der benachbarten Linien ermöglicht werden.

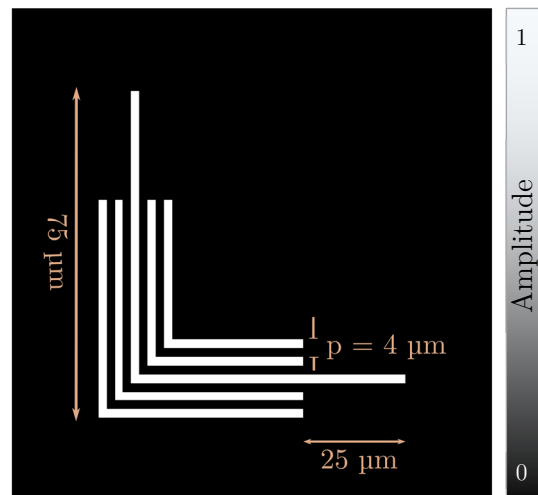


Abbildung 35: Dimensionen der angestrebten Intensitätsverteilung $I(x,y)$ des Luftbildes, ableitbar von der Amplitudenverteilung $A(x,y)$ mit $I \sim A^2$. Die weißen Bereiche entsprechen einer Amplitude $A(x,y) = 1$ und schwarz $A(x,y) = 0$.

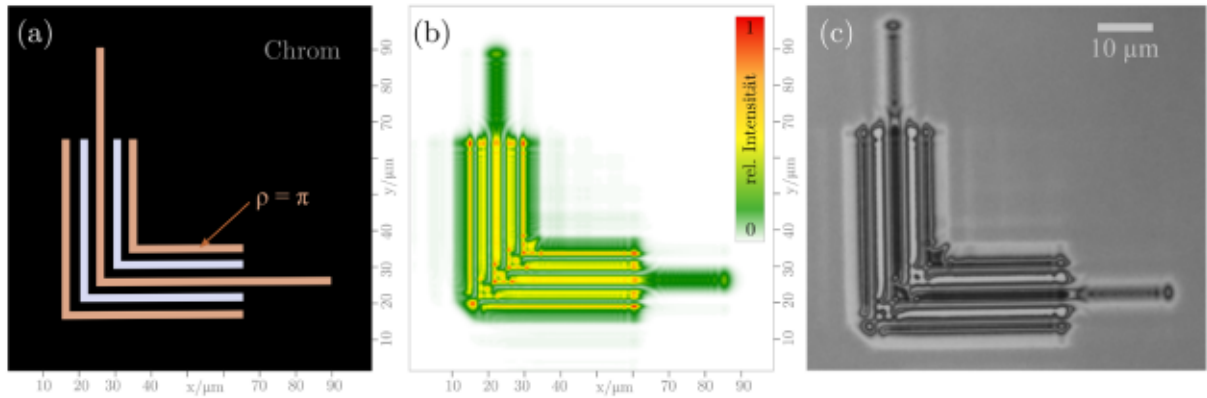


Abbildung 36: (a) AAPSM übertragen auf L-Struktur, mit lokaler 4 µm Periode ergibt eine unzureichende Qualität (b) der simulierten Intensitätsverteilung des Luftbildes 30 µm hinter der Photomaske. Die Mikroskopaufnahme in (c) zeigt das dazugehörige experimentelle Belichtungsergebnis in Photoresist (AZ 1512).

Für die Realisierung dieser Struktur wurde daher ein iterativer Algorithmus [271] entwickelt, der ein Maskendesign berechnet, welches die gewünschte Intensitätsverteilung im Luftbild für einen definierten Proximity-Abstand erzeugt. Hierbei wird das Maskenlayout wellenoptisch berechnet und Beugungseffekte gezielt genutzt. Zusätzlich müssen und werden auch Herstellungscharakteristiken bereits im Design der Photomaske berücksichtigt. Dabei limitiert hauptsächlich die kleinstmögliche Strukturbreite der Maskenherstellung das Design.

Darüber hinaus muss zu Beginn des Designs die Anzahl der amplituden- und phasenmodulierenden Level festgelegt werden. Eine Chromschicht auf der Photomaske entspricht einer binären Quantisierung der Amplitudenverteilung. Die Modulierung der Phase wird über unterschiedlich tief geätzte Level der Photomaske bestimmt. Je mehr Freiheitsgrade gewählt werden, umso größer ist letztendlich der Herstellungsaufwand. Daher sollte die Anzahl der verwendeten Phasenlevel minimiert werden.

Der Berechnungsalgorithmus des Photomaskenlayouts basiert auf der vor- und rückwärtigen Propagation der Transmissionsverteilung der Photomaske und der Anpassung der gewünschten Intensitätsverteilung in der Waferebene.

In der Waferebene wird die zu erzielende Intensitätsverteilung festgelegt, die in den Photoresist übertragen werden soll. Im aktuellen Beispiel entspricht das der Struktur in Abb. 35. Mathematisch betrachtet, basiert der iterative Prozess auf Projektionsoperatoren [272, 273]. Dabei spielt vor allem das Startdesign eine sehr bedeutende Rolle für das finale Layout bzw. für die Konvergenz des Algorithmus. Abbildung 37 zeigt das Prinzip des iterativen Algorithmus, mit einem diffraktiven optischen Element (DOE) als Startkonfiguration und einem Design für eine Multilevel-Photomaske als resultierendem Ergebnis.

Der iterative Prozess startet mit einer komplexen Photomaskenbeleuchtung $U_-(x, y, z_M)$. Dabei handelt es sich um eine senkrecht auf die Maske einfallende, monochromatische Beleuchtung mit einer ebenen Welle. Die wellenoptische Transmissionsverteilung der Photomaske von Phase und Amplitude kann direkt hinter der Maske mit $U_+(x, y, z_M) = T[U_-(x, y, z_M)]$ beschrieben werden, welche dann zur Waferebene propagiert.

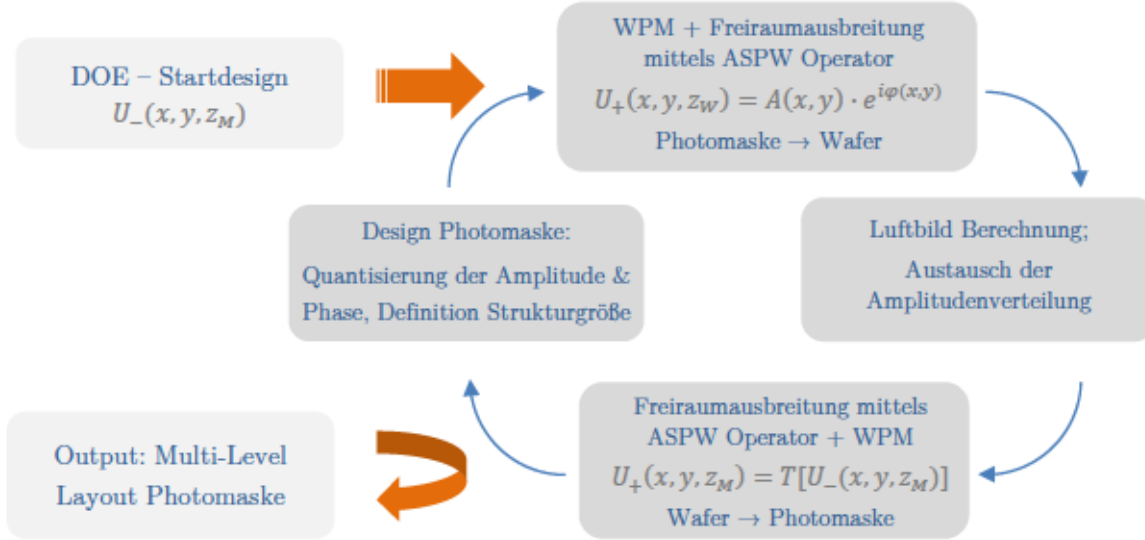


Abbildung 37: Abfolge und Prinzip des verwendeten iterativen Projektionsalgorithmus.

Für die Freiraumausbreitung entsprechend des definierten Proximity-Abstandes wird die Propagationsmethode des Spektrums ebener Wellen (engl. Angular Spectrum Plane Waves, ASPW) [274] verwendet. Das in der Waferebene entstehende Luftbild enthält ein komplexes Feld $U_+(x, y, z_W) = A(x, y) \cdot e^{i\varphi(x, y)}$, welches in Amplituden- $A(x, y)$ und Phasenverteilung $\varphi(x, y)$ zerlegt werden kann. Im Rahmen der iterativen Optimierung, wird in der Waferebene die propagierte Amplitudenverteilung mit der angestrebten Amplitudenverteilung, die aus der Zielverteilung der Intensität abgeleitet werden kann, ersetzt, wobei die Phasenfunktion erhalten bleibt. Hierbei spricht man von Phasenfreiheit. Nachdem die Projektionsoperatoren in der Waferebene angewandt wurden, wird das Feld zurück zur Maskenebene propagiert.

So lange die Strukturen der Photomaske bedeutend größer als die Beleuchtungswellenlänge sind, kann für die Transmission durch die Photomaske, die Photomaske selbst als dünnes Element betrachtet und für die Transmissionsberechnung die Dünne-Elemente-Approximation angenommen werden [249, 274, 275]. Da im vorliegenden Optimierungsprozess die Strukturgrößen minimal 200 nm betragen können und diese somit kleiner als die i-Linien Beleuchtungswellenlänge sein können, wurde die so genannte „wave-propagation-method“ (WPM) [276, 277] für finite Elemente zur Berechnung der Transmissionsfunktion $T[U_-(x, y, z_M)]$ der Photomaske implementiert, um Fehler zur Berechnung des Luftbildes zu verringern. Die Vorwärtsberechnung resultiert folglich erst aus der WPM, gefolgt von der ASPW Propagation. Rückwärts, von Wafer- zu Maskenebene, erfolgt die Reihenfolge umgedreht: erst ASPW Propagation und anschließend WPM.

Der letzte Durchgang der Iteration mündet in einer quantisierten Amplituden- sowie Phasenverteilung. Abhängig von der zu Designbeginn festgelegten Anzahl der Phasenwerte, kann aus der lokalen Phasenverteilung ein entsprechendes Höhenprofil für die Herstellung der Photomaske unter Verwendung des physikalischen Zusammenhangs in Formel (4.6) ermittelt werden.

Durch das Hinzufügen ausgewählter Parameter der Zielstruktur kann die Iteration beeinflusst werden. Eine Betonung der Kanten der einzelnen Linien in der Zielstruktur dient der

Verbesserung des Kontrastes des Luftbildes und somit letztendlich zur Erzeugung steilerer Seitenwände im Photoresist. Die in Abb. 38 angedeutete Kantenerhöhung wurde im gesamten Optimierungsprozess als Zielfunktion der Intensitätsverteilung implementiert.

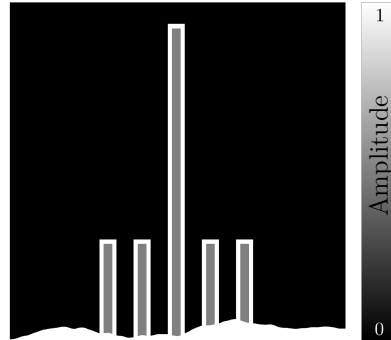


Abbildung 38: Ausschnitt der Amplituden-Zielfunktion mit Betonung der Kanten.

Darüber hinaus wird eine zusätzliche Integration einer alternierenden Phase zur Startkonfiguration als potenzielle Auflösungssteigerung, wie im vorausgegangenen Beispiel (vgl. Abb. 32), als sinnvoll erachtet, denn eine alternierende Phasenänderung von π zwischen benachbarten Linien kann durch destruktive Interferenz die räumliche Auflösung verbessern.

Für die Erzeugung der Startkonfiguration, wurde somit die gewünschte Intensitätsverteilung des Luftbildes (Abb. 35) mit einer alternierenden Phase von π für benachbarte Linien ergänzt und zurück zur Maskenebene propagiert. Hierfür wurde ein Maske-Wafer-Abstand von 30 μm genutzt, welcher gleichzeitig dem Proximity-Abstand für die Photomaskenoptimierung entspricht.

Die resultierende komplexe Amplitudenverteilung nach rückwärtiger Propagation in die Maskenebene wurde in eine Maskentransmissionsfunktion mittels Dünner-Elemente-Approximation transferiert. Diese Struktur wird als diffraktives Element mit kontinuierlicher Amplituden- (Abb. 39(a)) und Phasenverteilung (Abb. 39(b)) als Startkonfiguration für die Iteration verwendet.

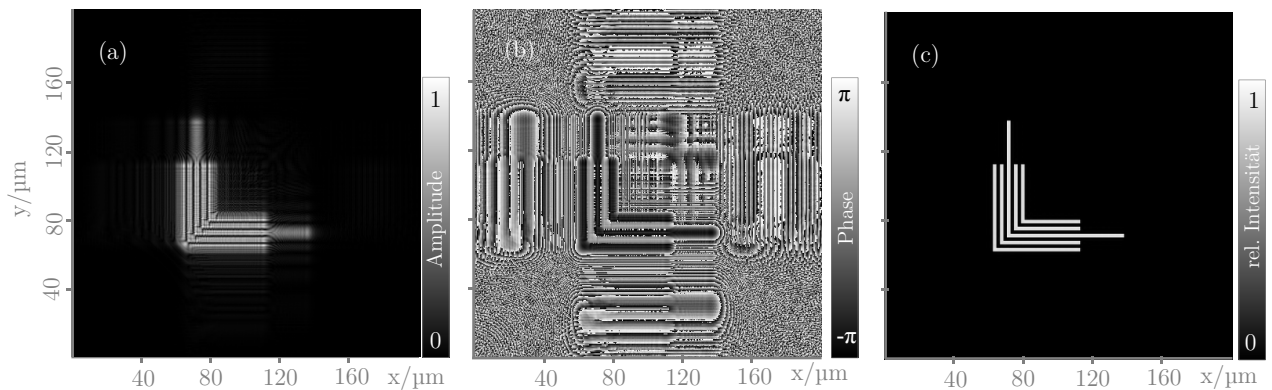


Abbildung 39: Mittels rückwärtiger Propagation berechnetes diffraktives Element als Startkonfiguration mit kontinuierlicher (a) Amplituden- und (b) Phasenverteilung, welches (c) eine perfekte Intensitätsverteilung als Luftbild 30 μm hinter der Photomaske erzeugt.

Kontinuierliche Phasen- und Amplitudenverteilungen können allerdings kaum mit existierenden Technologien gefertigt werden. Um eine Herstellung zu ermöglichen, wurden die Anzahl der

Amplituden- und Phasenlevel während der Iteration auf zwei bzw. drei Level für verschiedene Designs reduziert.

Die Level, insbesondere für die Phasenschiebung, können im Allgemeinen beliebig erweitert werden. Umso mehr Phasen- und Amplitudenlevel realisiert werden können, desto besser ist die Approximation der Zielverteilung. Je mehr Phasenstufen erlaubt werden, desto aufwändiger wird allerdings die Herstellung der Photomaske, denn umso mehr Lithografieschritte für die Chrom- und Quarzglasstrukturierung sind notwendig. Die Anzahl der Amplitudenlevel ist nicht ohne weiteres variabel gestaltbar. Für eine mehrstufige Amplitudenmodulation (Anzahl der Level >2) bedarf es z.B. der bereits erwähnten Halbton- oder Grautonmasken [269, 278]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Amplitudenmodulation mittels binär strukturierter Chromschicht realisiert, um den Herstellungsaufwand so gering wie möglich zu halten.

Unter Verwendung der in Abb. 39 gezeigten Startkonfiguration aus komplexer Amplituden- und Phasenverteilung wurde zuerst eine kombinierte binäre Amplituden- sowie Phasenverteilung angestrebt. Abgesehen von reinen amplitudenmodulierenden Photomasken, stellt das die, hinsichtlich Fertigungsaufwand, einfachste Variante dar. Bereits nach 20 Iterationen ergab sich ein optimiertes Photomaskendesign eines diffraktiven Elementes mit quantisierter Amplituden- (Abb. 40 (a)) sowie Phasenverteilung (Abb. 40 (b)), welches ein simuliertes Luftbild guter Qualität für den definierten Proximity-Abstand von $30\text{ }\mu\text{m}$ generiert (Abb. 40 (c)).

Auffällig bei dem resultierenden Ergebnis der Phasenverteilung in Abb. 40 (b) ist insbesondere die verbleibende alternierende Phase, der Bereiche, die die Informationen benachbarter Linien kodieren. Das wiederum unterstreicht die Bedeutung der Startkonfigurationen für den iterativen Projektionsalgorithmus.

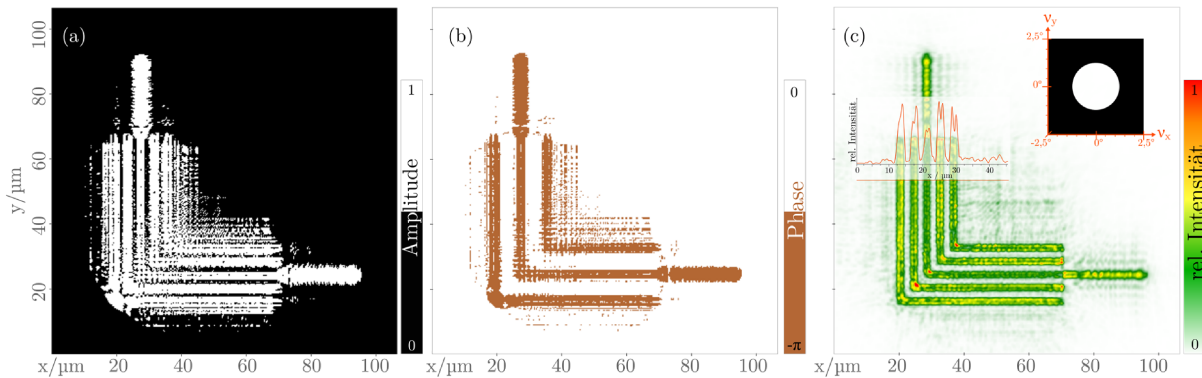


Abbildung 40: Iterativ optimiertes Photomaskendesign mit (a) binärer Amplituden- sowie (b) binärer Phasenverteilung, welches das dazugehörige Luftbild in (c), unter Verwendung der abgebildeten IFP zur Definition des Winkelspektrums $V_{x/y}$, generiert. Eine Amplitude von eins (weiß) bedeutet Öffnungen der Chrommaske, während eine Phase von $-\pi$ (braun) tiefgeätzte Bereiche in das Quarzglas ergibt.

Für eine erste Abschätzung der Funktionsweise der kombinierten Amplituden- und Phasenverteilung wurde die Belichtung dieser Struktur mit einem Winkelspektrum von $v_{x/y} = \pm 1,3^\circ$ simuliert und ergab das in Abb. 40 (c) abgebildete Luftbild. Alle fünf Linien konnten in guter Qualität getrennt voneinander aufgelöst werden. Das Streulicht, welches die Struktur umgibt, stört den Kontrast der Struktur unwesentlich und wäre ausreichend gering, die Struktur in Photoresist übertragen zu können. Die Verwendung eines größeren Winkelspektrums

kann helfen die Intensitätsartefakte in den Linien selbst zu reduzieren und eine Mittelung anhand verschiedener Beleuchtungswinkel zu erzeugen.

Abbildung 41 zeigt den Einfluss von zwei alternativen Beleuchtungsspektren auf das simulierte Luftbild mit der in Abb. 40 zugrundeliegenden Amplituden- und Phasenfunktion.

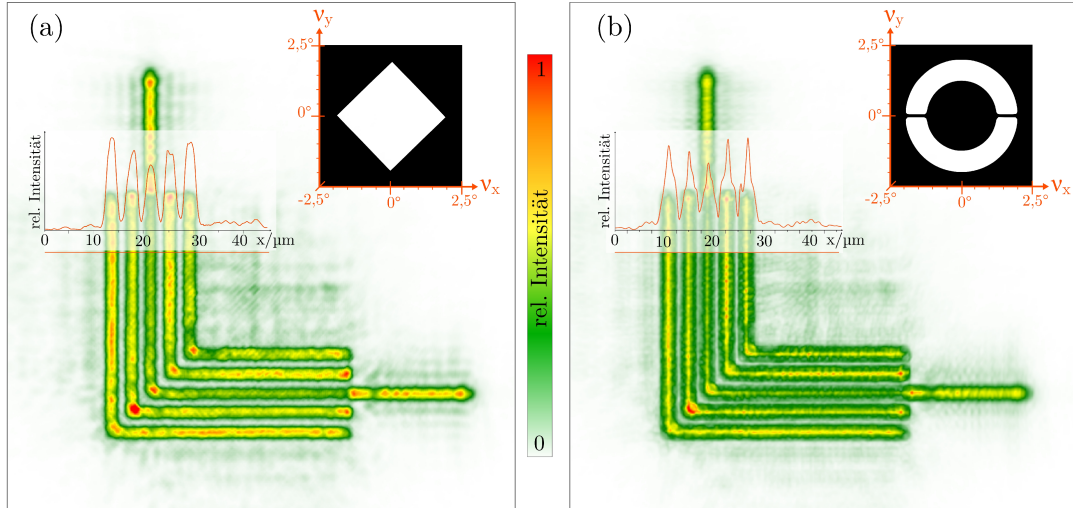


Abbildung 41: Einfluss verschiedener Winkelspektren $v_{x/y}$ auf das simulierte Luftbild im Proximity-Abstand von 30 µm. Die rote Linie markiert die Position des gezeigten Intensitätsprofils. Das Winkelspektrum wird mittels IFP definiert: (a) ein 45°-rotiertes Quadrat mit 30 mm Kantenlänge, (b) Ringblende mit 29 mm $< \varnothing < 47$ mm.

Durch eine gezielte Wahl der Photomaskenbeleuchtung kann die Intensitätsverteilung des Luftbildes, wie in Abb. 41 sichtbar, beeinflusst werden. Bei der Wahl der Winkelspektren können Erfahrungen und Beispielprozesse der vergleichbaren „Off-Axis“ Beleuchtung der Projektionslithografie helfen. Verschiedene Simulationen ergaben zwei potenzielle Winkelspektren für eine Optimierung des Luftbildes und folglich eine optimierte Strukturübertragung. So ermöglicht z. B. ein Winkelspektrum eines um 45° gedrehten Quadrats einen verbesserten Kontrast wie auch eine verbesserte Homogenisierung der Intensitätsverteilung der einzelnen Linien des Luftbildes (Abb. 41 (a)). Ein anderes Winkelspektrum zur Auflösungsverbesserung stellt das einer Ringbeleuchtung mit Beleuchtungswinkeln von $1,24^\circ < v_{x/y} < 2,02^\circ$ dar. Das simulierte Luftbild zeigt eine Betonung der einzelnen Linien Schwerpunkte, mit Ausnahme der verlängerten mittleren Linien. Diese Art der Beleuchtung kann von Interesse sein, insbesondere Linien höherer Auflösungen zu erzeugen. Für das aktuelle Beispiel soll allerdings eine gleichmäßige Ausleuchtung der einzelnen Linien stattfinden, wofür die Beleuchtung mit dem um 45° gedrehten Quadrat als am besten geeignet zu sein scheint. Im Folgenden soll dieses Winkelspektrum auch für weitere Simulationen zur Berechnung der Luftbilder und somit für eine Abschätzung der Qualität der mittels Iteration bestimmten Amplituden- und Phasenverteilung genutzt werden.

Die individuelle Beleuchtung der Photomaske kann die Qualität der Strukturherstellung allerdings nur begrenzt verbessern. Durch die Verwendung eines weiteren Freiheitsgrades der Photomaskeengeometrie, wie der einer weiteren Phasenstufe, kann das Luftbild und somit die Strukturübertragung weiter optimiert werden.

Ziel einer neuen Iteration ist eine binäre Amplituden- sowie dreistufige Phasenverteilung. Die Ergebnisse einer erneuten 20-fachen Iteration mit der in Abb. 39 definierten Startkonfiguration sind in Abb. 42 dargestellt.

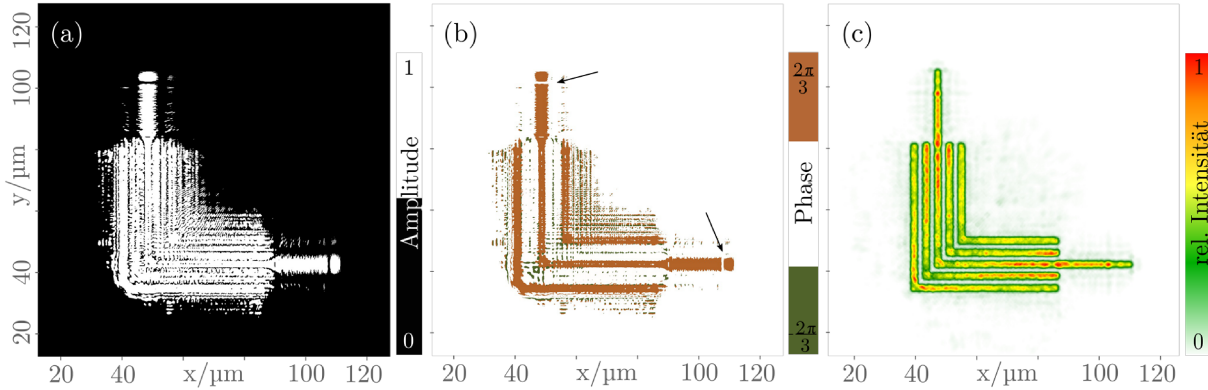


Abbildung 42: Iteratives Ergebnis für ein Photomaskendesign mit (a) binärer Amplituden- sowie (b) 3-stufiger Phasenverteilung, welches das simulierte Luftbild in (c) generiert. Eine Amplitude von eins (weiß) bedeutet Öffnungen der Chrommaske, während eine Phase von $-\frac{2\pi}{3}$ (grün) sowie $\frac{2\pi}{3}$ (braun) zusätzlich unterschiedlich tiefgeätzte Bereiche in das Quarzglas bedeuten.

Bereits ein weiteres, ein drittes, Phasenlevel steigert die Qualität des Luftbildes in Abb. 42 (c) im Vergleich zu Abb. 41 (a) erheblich. Der Kontrast hat sich deutlich verbessert, und auch die Intensitätsverteilung der Linien ist homogener geworden und die Betonung der Ecken der einzelnen Linien wurde geringer. Allerdings wird die Qualität der Intensitätsverteilung der mittleren, isolierten Linien durch eine Unterbrechung in der Amplituden-, sowie Phasenverteilung gestört.

Mittels verschiedener Startkonfigurationen oder auch verschiedener Operatoren während der Iteration können verschiedene Photomaskendesigns generiert werden.

So zeigt das berechnete Ergebnis in Abb. 43 eine binäre, inverse Option der Phasenverteilung im Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen in Abb. 41 (a) oder 42 (b).

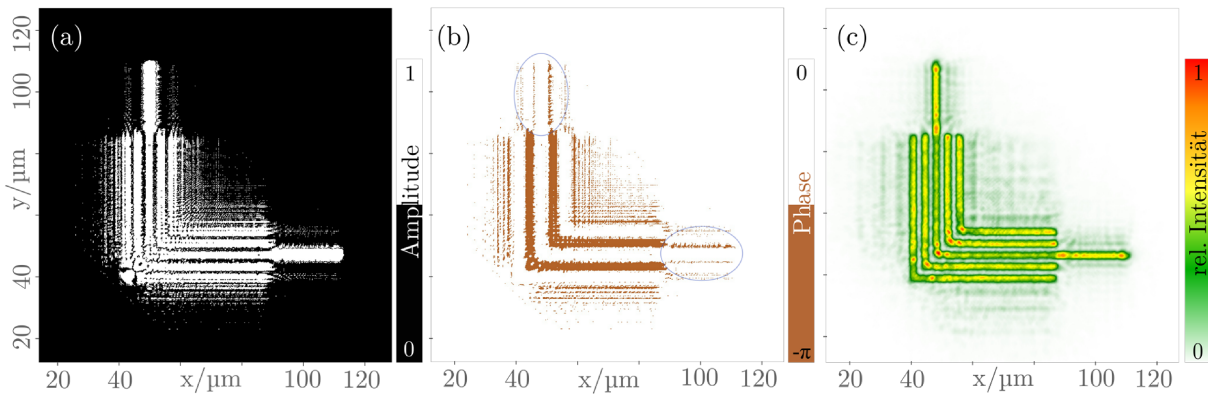


Abbildung 43: Photomaskenlayout mit quantisierter, binärer (a) Amplituden- sowie (b) Phasenverteilung, welches (c) ein Luftbild guter Qualität erzeugt.

Auch dieses Design einer binären Amplituden- sowie Phasenverteilung, die umgangssprachlich als 3-stufige Photomaske beschrieben wird, generiert ein Luftbild (Abb. 43 (c)) guter Qualität, vergleichbar den bisher erzielten Ergebnissen. Die Umverteilung der kodierten Bereiche einer Phasenschiebung um $-\pi$ hatte somit keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität des Luftbildes.

Besonders interessant ist jedoch die Verteilung der Phase im Bereich der verlängerten mittleren Linien, die in Abb. 43 (b) mittels blauen Kreisen hervorgehoben sind. Die in diesen Bereichen entstandenen „Pixel“ können im übertragenen Sinn als „scattering bar“ der OPC verstanden werden. Dabei erinnern die generierten Designs an „rule-based“ OPC Merkmale. Vorteil in diesem Design ist, dass das Layout der Amplituden- und Phasenverteilung im verlängerten Bereich der mittleren Linie nicht unterbrochen ist, ähnlich dem Ergebnis in Abb. 40.

Für eine weitere Optimierung wurde das Startdesign noch einmal verändert. Die bisherigen Simulationen haben gezeigt, dass vor allem die isolierten, mittleren Linien Schwierigkeiten darstellen. Aus diesem Grund wurde der Phasenverteilung der Startkonfiguration ein zusätzlicher Phasensprung von π innerhalb der mittleren Linien implementiert und resultiert schließlich in der in Abb. 44 (a) und (b) dargestellten binären Amplituden- und Phasenverteilung. Dabei fällt sofort die erhaltene Phasenverteilung aus der Startkonfiguration und insbesondere der Phasensprung am Übergang zum isolierten Bereich der mittleren Linie auf. In Abb. 44 (b) ist dieser Bereich mittels blauer Kreise deutlich gemacht.

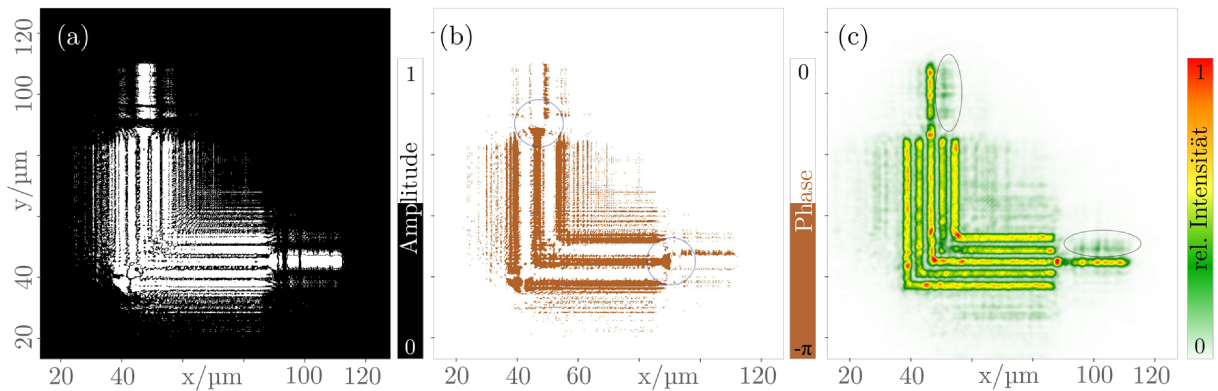


Abbildung 44: Iterativ ermitteltes Photomaskendesign mit quantisierter binärer (a) Amplituden- sowie (b) Phasenverteilung, welches das simulierte Luftbild in (c) erzeugt.

Allerdings erzeugt das Photomaskendesign bestehend aus der in Abb. 44 (a) und (b) dargestellten Amplituden- und Phasenfunktion nur eine Intensitätsverteilung im Luftbild (Abb. 44 (c)) von unzureichender Qualität. Die Implementation des Phasensprungs innerhalb der mittleren Linien führt zu Unterbrechungen in der Amplituden- sowie Phasenverteilung und folglich auch in der Intensitätsverteilung des Luftbildes. Dies allein macht das Photomaskendesign bereits unbrauchbar für die Realisierung der Struktur in Photoresist. Darüber hinaus zeigen sich im Allgemeinen größere Intensitätsschwankungen innerhalb der einzelnen Linien verglichen zu den zuvor erzeugten Photomaskendesigns.

Des Weiteren zeigt sich auch, dass, wenn die Anzahl bzw. die Konzentration der SRAFs (engl. sub-resolution assist-features, s. Kapitel 3.4.4) zu groß wird, das Streulicht steigt. Im aktuellen Beispiel tritt z.B. verstärkt Streulicht im rechten bzw. oberen Teil des verlängerten Bereiches der mittleren Linien auf, kenntlich gemacht durch die schwarzen Kreise in Abb. 44 (c). Auch wenn die SRAFs so klein sind, dass sie nicht aufgelöst werden, so erhöht sich dennoch der Anteil an transmittierendem Licht in dem Bereich in dem eine hohe Dichte an OPC Strukturen vorzufinden ist. Obwohl dieses Beispiel ein ungeeignetes Photomaskenlayout zur Strukturierung der L-Struktur ergeben hat, konnten mit den Startkonfigurationen zuvor sehr gute Ergebnisse

erzielt werden. Durch eine geeignete Wahl implementierter Eigenschaften im Start-DOE konnten verschiedene erfolgreiche Photomaskendesigns mittels des iterativen Projektionsalgorithmus optimiert werden.

Es wurden diffraktive Elemente ermittelt, die ein Luftbild mit sehr guten Intensitätsverteilungen für eine mögliche Strukturierung generieren. Da die Unterschiede der Luftbilder der binären Photomaskenlayouts relativ gering ausfielen, wurde repräsentativ das Design in Abb. 40 als Photomaskenstruktur realisiert. Ein mittels REM aufgenommenener Ausschnitt der hergestellten drei-stufigen Photomaske ist in Abb. 45 zu sehen.

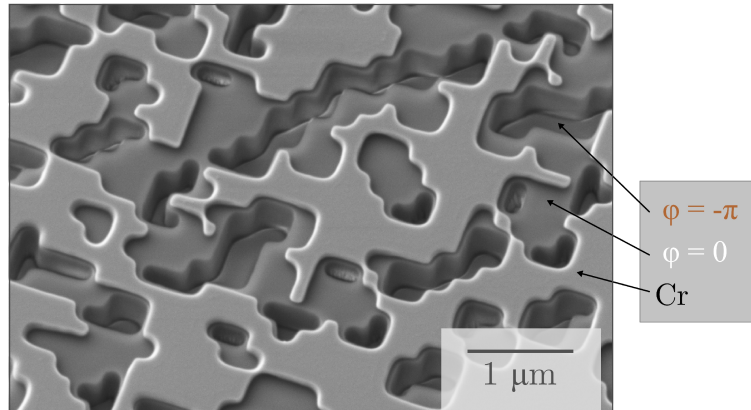


Abbildung 45: Das Bild einer REM-Aufnahme zeigt einen Ausschnitt der dreistufigen Photomaske mit minimaler Strukturgröße von 200 nm.

Diese Photomaske wurde anschließend auch für eine experimentelle Verifizierung verwendet. Zur Umsetzung wurde 500 nm dicker Photoresist AZ 1505 auf einem 4“ Wafer aufgeschleudert und anschließend mit einer Dosis von 15 mJ/cm^2 belichtet. Das verwendete Winkelspektrum entspricht demselben, welches für die Simulation in Abb. 41 (a) verwendet wurde: ein um 45° rotiertes Quadrat mit 30 mm Kantenlänge ergibt eine Photomaskenbeleuchtung mit einem Winkelspektrum und maximalen Beleuchtungswinkeln von etwa $\nu_{x/y} = \pm 1,8^\circ$. Das Ergebnis der entwickelten Photoresiststruktur ist in Abb. 46 zu sehen.

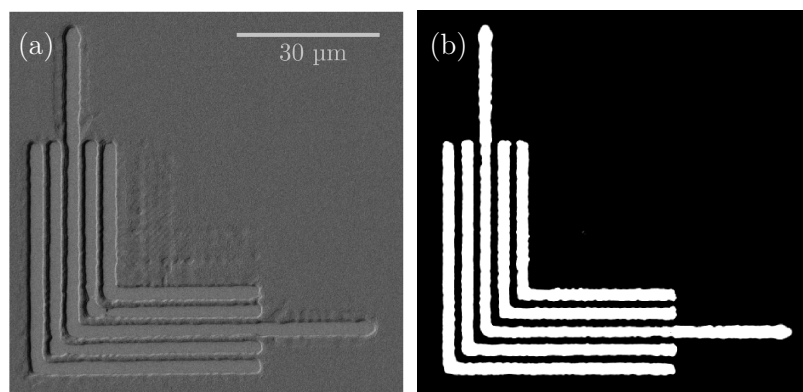


Abbildung 46: (a) Mittels REM aufgenommenes Bild der entwickelten Photoresiststruktur unter Verwendung eines Proximity-Abstandes von 30 µm im Vergleich mit (b) dem binarisierten Intensitätsprofil aus Abb. 41 (a) unter Annahme eines Intensitäts-Schwellwertes als „Dose-to-clear“*.

* Benötigte Beleuchtungsintensität um den Photoresist ausreichend zu belichten, dass er im anschließenden Entwicklungsschritt herausentwickelt wird.

Mittels des iterativ optimierten Photomaskendesigns (Abb. 40) konnte eine erfolgreiche Strukturierung der isolierten, komplexen L-Struktur mit lokalem Linienabstand von $2\text{ }\mu\text{m}$ in 500 nm dicken Photoresist mit $30\text{ }\mu\text{m}$ Proximity-Abstand erfolgen. Damit konnte die Auflösungsgrenze klassischer Mask Aligner Lithografie für Mikrostrukturen (s. Abschnitt 3.3) um einen Faktor 2 verschoben und die Auflösung nicht-periodischer Strukturen mittels hoch entwickelter Photomaskentechnologie deutlich verbessert werden.

Dabei erinnern die resultierenden Amplituden- und Phasenverteilungen für die jeweilige Photomaskenebene an komplexe „model-based“ OPC Strukturen (siehe Abschnitt 3.4.4) und können auch als diese verstanden werden.

Abschließend konnten auch die Simulationen mittels experimenteller Umsetzung verifiziert werden. Darüber hinaus erlaubt die Simulation des Luftbildes eine sehr gute Prognose der Struktur in Photoresist. Der Vergleich der REM-Aufnahme der Photoresiststruktur mit einer binarisierten Intensitätsverteilung in Abb. 46 zeigt sehr gute Übereinstimmungen. Unter diesen Gesichtspunkt kann bereits im Vorfeld eine Abschätzung der Strukturübertragung erfolgen. Die Analogie von Simulation und Experiment ist ein wichtiges Ergebnis für folgende Entwicklungen von diffraktiven, komplexen Photomasken.

4.3 Doppelseitig-strukturierte Photomaske

In der Regel nutzt die Mask Aligner Lithografie binäre Photomasken, deren zum Wafer orientierte Seite, auch als Vorderseite deklariert, ausschließlich strukturiert ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges Konzept einer doppelseitig strukturierten Photomaske erstmals entwickelt und getestet. Durch das Nutzen der Rückseite der Photomaske werden zusätzliche Freiheitsgrade geschaffen, die die Propagation von Licht beeinflussen oder manipulieren können.

Eine Herausforderung dieser Methode ist die Ausrichtung von Rück- zur Vorderseite. Für eine erfolgreiche Strukturierung ist dies von sehr großer Bedeutung. Hierfür wurde eigens eine Technologie basierend auf diffraktiven Elementen entwickelt, die in diesem Kapitel ebenfalls vorgestellt wird. Abbildung 47 zeigt die schematische Anordnung der wichtigsten Elemente der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten doppelseitig-strukturierten Photomaske.

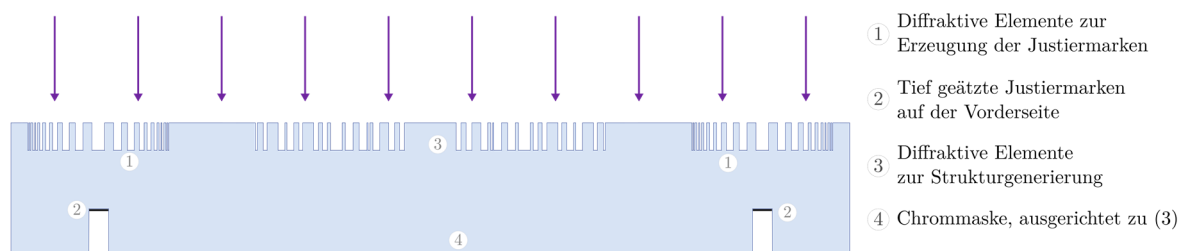


Abbildung 47: Skizze der doppelseitig-strukturierten Photomaske im Querschnitt.

Um zunächst das Prinzip und insbesondere die Herstellung testen zu können, wurde das Design für einen einfachen Anwendungsfall entworfen. Ziel soll es sein, eine hohe Schärfentiefe unter Verwendung eines Proximity-Abstandes von $30\text{ }\mu\text{m}$ und einer Beleuchtungswellenlänge von

365 nm zu generieren, um dicken Photoresist ($d \geq 20 \mu\text{m}$) zu strukturieren. Ein Beispiel, bei dem die Strukturierung dicker Lacke benötigt wird, ist die Herstellung von Durchkontaktierungen (engl. Through-Silicon-Vias, TSV) für das Integrieren und Vernetzen von Chips, die in vertikaler Richtung gestapelt werden (engl. Wafer-Level-Packaging) [279].

Um die Herstellung der Photomaske etwas zu vereinfachen, sind Phasen- und Amplitudenelemente getrennt voneinander auf der Photomaske angeordnet, wie die Abb. 47 zeigt. Durch die Verwendung von Phaseelementen auf der Rückseite können Intensitätsverteilungen effizient vorstrukturiert werden und eine beliebige, komplexe Feldverteilung erzeugt werden, ähnlich der Idee zur Strahlformung von Schimmel et al. in [280]. Durch eine auf der Vorderseite angeordnete Chrommaske, ausgerichtet zu den diffraktiven Elementen der Rückseite, kann zusätzlich unerwünschtes Streulicht ausgeblendet werden. Abbildung 48 zeigt die zugrundeliegende Funktionsweise der strukturzeugenden Elemente mittels diffraktivem DOE auf der Rückseite und der zugehörigen Chrommaske auf der Vorderseite der Photomaske.

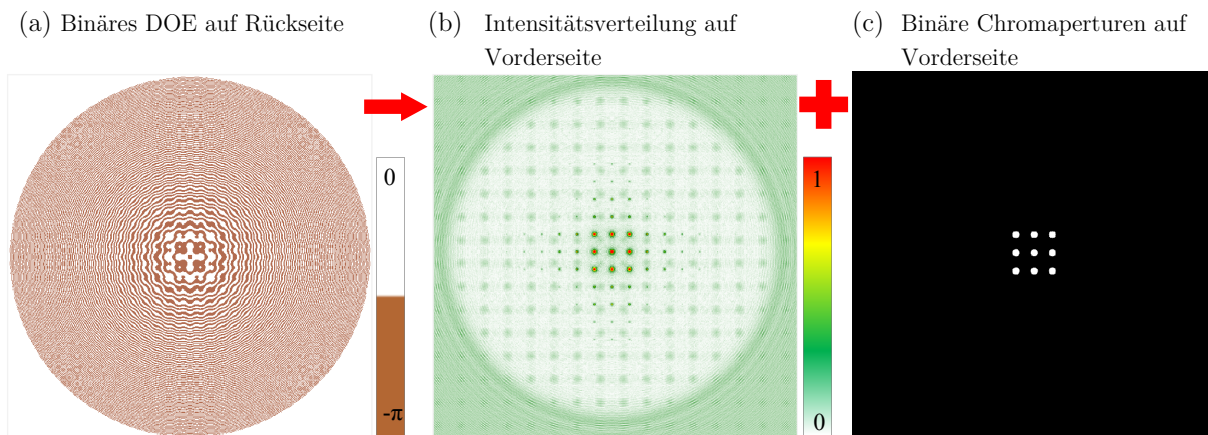


Abbildung 48: Schematisches Funktionsprinzip der Strukturzeugung mittels doppelseitiger Photomaske: (a) Binäre Phaseelemente auf der Rückseite erzeugen Intensitätsverteilung auf Vorderseite in (b), wo unerwünschtes Streulicht und höhere Beugungsordnungen durch (c) Chromaperturen (schwarz = Chrom) ausgeblendet werden.

Die Rückseite der Maske, die Wafer abgewandte Seite, enthält binäre Phaseelemente mit zwei verschiedenen Funktionen. Zum einen handelt es sich um diffraktive Justiermarken, die zur Justage der Vorder- und Rückseite benötigt werden. Zum anderen befinden sich auf der Rückseite die diffraktiven Elemente zur Strukturgenerierung (Abb. 48 (a)). Die zu erzeugende Struktur stellt ein Array aus 3×3 Kreisflächen mit einem Durchmesser von $20 \mu\text{m}$ und einem lokalen Abstand von $50 \mu\text{m}$ dar. Dies entspricht gleichzeitig dem Array aus Chromaperturen auf der Vorderseite der Maske, wie in Abb. 48 (c) dargestellt. Diese Aperturen minimieren Streulicht, sowie höhere Beugungsordnungen ausgehend von den diffraktiven Elementen der Rückseite (Abb. 48 (b)) und können so den Kontrast der Belichtung erhöhen.

Die binären Phaseelemente auf der Photomaskenrückseite erzeugen eine der Zielverteilung ähnliche Intensitätsverteilung auf der Photomaskenvorderseite (Abb. 48 (b)). Dabei wird die Phasenschiebung durch eine definierte Strukturierung des Photomaskensubstrates erzielt. Für

eine Phasenschiebung von $-\pi$ kann die notwendige Ätztiefe abhängig von der verwendeten Beleuchtungswellenlänge und dem verwendeten Material mittels Formel (4.6) berechnet werden.

Das Design der binären, diffraktiven und strukturebenden Elemente basiert auf der Überlagerung von verschiedenen Fresnelzonenplatten* (FZP) für eine i-Linienbeleuchtung. Jede einzelne FZP generiert einen 20 μm Spotdurchmesser in der Waferebene bei 30 μm Proximity-Abstand. Mittels einer lateralen Verschiebung der einzelnen FZP sowie einer anschließenden Überlagerung kann ein Array von Spots erzeugt werden. Im vorliegenden Design wurde das Array auf 3 x 3 Elemente begrenzt, da die Überlagerung zu vieler Elemente die Funktionsweise der einzelnen Linsen beeinträchtigt und die fokussierende Wirkung nicht mehr ordnungsgemäß und wie gewünscht funktioniert. Werden zu viele Elemente kombiniert, wird der flächenmäßige Anteil der einzelnen Linsen an der Gesamtgröße immer kleiner, womit sich die Phasenmodulation und somit die fokussierende Wirkung des einfallenden Lichtes verschlechtert. Komplexere Strukturen könnten auch mittels IFTA berechnet und optimiert werden. Abbildung 49 (a) zeigt eine einzelne binäre Fresnelzonenplatte, sowie deren 9-fache Überlagerung in (b) zur Erzeugung des 3 x 3 Arrays aus 20 μm großen Kreisen.

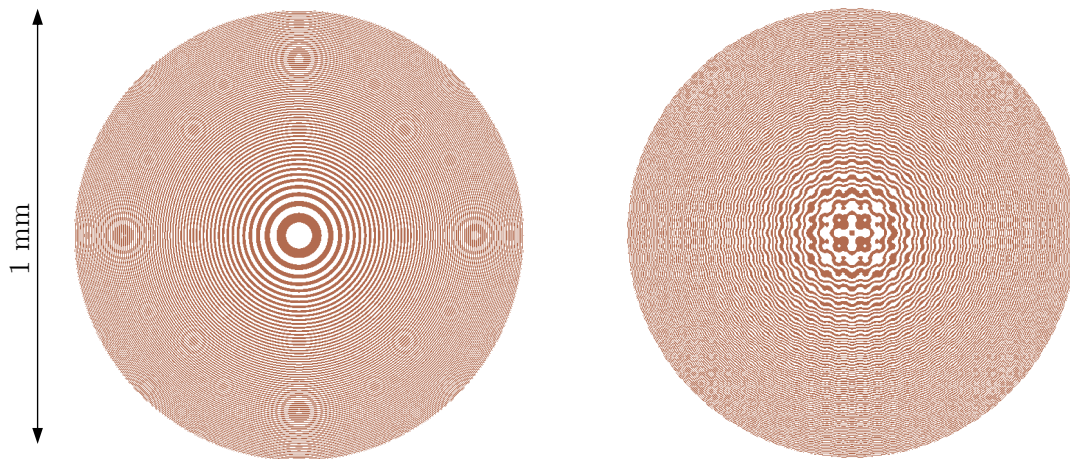


Abbildung 49: (a) Binäres Design einer Fresnelzonenplatte mit einer Brennweite $f = 4,5 \text{ mm}$ für $\lambda = 365 \text{ nm}$. (b) zeigt die Superimposition aus neun FZP zur Erzeugung eines Arrays mit 50 μm lokalem Abstand. Beide Elemente sind binäre Phaseelemente. Weiß entspricht $\varphi = 0$ und braun $\varphi = -\pi$, die gleichzeitig die tiefgeätzten Bereiche im SiO_2 Substrat darstellen.

Das diffraktive Array-Element in Abb. 49 (a) hat einen Durchmesser von einem Millimeter. Je größer das diffraktive Feld, umso größer der Anteil des einfallenden Lichtes, welcher bereits auf der Rückseite umverteilt wird. Indem die FZP als binäre Phaseelemente statt typischerweise als binäre Amplitudenelemente integriert werden, kann die Intensität erhalten und kontrolliert an die wichtigen Bereiche der Vorderseite umverteilt werden. Umso höher die Intensitäten in den Maskenöffnungen der Vorderseite sind, desto kürzer sind letztendlich auch die Belichtungszeiten, was bei der Wahl der Belichtungsdosis beachtet werden muss.

* Eine Fresnelzonenplatte ist ein diffraktives Element, welches das einfallende Licht fokussiert. So ein Element besteht aus zentrisch angeordneten Ringen, die nach außen immer dünner werden. Fresnelzonenplatten können entweder als Phasen oder als Amplituden modulierende Elemente gestaltet werden.

Je größer die FZP gewählt wird, umso höher sind die konstruktiv interferierenden Anteile im Brennpunkt. Aus diesen Grund wird der Durchmesser der FZP so groß wie möglich gewählt. Allerdings steigt mit zunehmender Größe der FZP auch deren NA^* , womit gleichzeitig die erreichbare Schärfentiefe sinkt, was im Design ebenfalls optimiert werden muss. Gleichzeitig sinkt mit größer werdenden Durchmesser der FZP auch die minimale Strukturgröße der einzelnen Fresnelzonen. Der Durchmesser der FZP wird somit durch die Definition der kleinsten Strukturgröße im Rahmen der Herstellungskriterien bestimmt und gegebenenfalls eingeschränkt. Zwischen Funktionalität, d.h. der damit verbundenen Anzahl der Zonen der FZP und den entstehenden Kosten muss ein Kompromiss gefunden werden. Um den Herstellungsaufwand der doppelseitig strukturierten Photomaske im Rahmen zu halten, wurde die minimale Strukturgröße der diffraktiven Elemente auf $1\text{ }\mu\text{m}$ limitiert.

4.3.1 Die Ausrichtung von Vorder- zur Rückseite der Photomaske

Wie bereits mehrfach erwähnt, sind Justiermarken für die Ausrichtung der Elemente von Vorder- zur Rückseite von großer Bedeutung für den Erfolg der Strukturzeugung. Die entwickelte Technologie basiert auf einer UV-Belichtung diffraktiver Strukturen auf der Rückseite (s. Abb. 47), die in einem auf der Vorderseite der Photomaske aufgetragenen Photoresist Kreuze erzeugen. Das Design dieser diffraktiven Elemente ist in Abb. 50 (a) dargestellt und basiert ebenfalls auf FZP. Statt sphärischer Linsen liegen dem Design allerdings Zylinderlinsen zugrunde. Auch hier gilt, je größer die Anzahl der Zonen für die FZP, umso kleiner kann die mögliche fokale Auflösung werden. Limitierend für das Design war auch hier die minimal adressierte Strukturgröße von $1\text{ }\mu\text{m}$. Mit dem entwickelten binären Design kann eine minimal simulierte Linienbreite von $5\text{ }\mu\text{m}$ und eine $40\text{ }\mu\text{m}$ große Schärfentiefe erreicht werden, wie die Ergebnisse in Abb. 50 (c) und (d) zeigen. Die große Schärfentiefe ermöglicht einen unkritischen Transfer der Struktur von Rück- auf Vorderseite, welcher zugleich tolerant gegen Dickenvariationen des Maskensubstrates oder des Photoresistes ist.

Eine vollständige Simulation der diffraktiven Justiermarke in Abb. 50 (a) ergibt ein Kreuz guter Qualität auf der Vorderseite der Photomaske, dargestellt in Abb. 50 (b). Für die Simulation wurde ein Winkelspektrum von $\pm 0,043^\circ$ der Photomaskenbeleuchtung verwendet. Dies entspricht einer kreisförmigen IFP mit $0,5\text{ mm}$ Durchmesser. Da die Größe der IFP mit einer Irisblende mit variabler Öffnungsweite realisiert wurde, erfolgte die Einstellung relativ ungenau, wodurch es zu geringen Abweichungen kommen konnte. Durch einen größeren IFP-Durchmesser steigt auch die Größe der Beleuchtungswinkel, wodurch ebenfalls eine größere Linienbreite des Kreuzes im Photoresist als in der Simulation zu erwarten ist, was die REM-Aufnahme in Abb. 50 (c) bestätigt. Nichtsdestotrotz ist die Struktur ausreichend klein für eine präzise Positionsbestimmung für die Strukturierung der Vorderseite und sichert so eine Genauigkeit von $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ der Ausrichtung beider strukturierter Photomaskenseiten zueinander.

* Die numerische Apertur (NA) beschreibt die Lichtstärke und das Auflösungsvermögen eines optischen Systems.

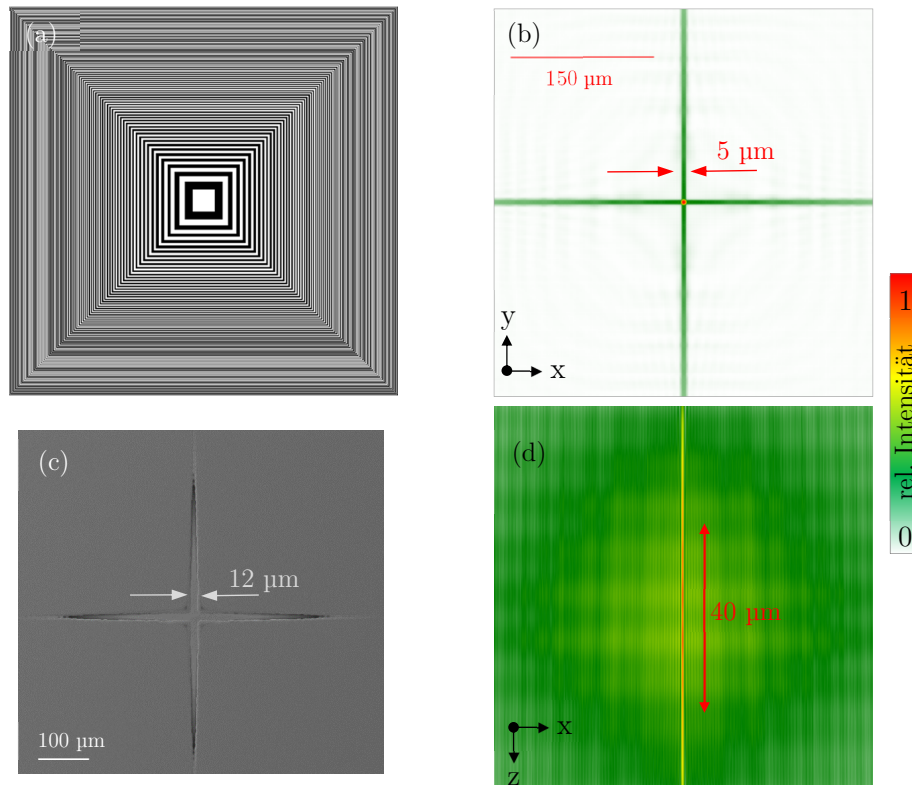


Abbildung 50: Justiermarken der doppelseitigen Photomaske als (a) diffraktive, binäre Amplitudenstruktur auf der Rückseite der Photomaske (schwarz = Chrom), mit dazugehöriger Simulation des Luftbildes auf der Photomaskenvorderseite in (b) als Kreuz sehr guter Qualität mit einer simulierten Schärfentiefe von ca. 40 µm in (d). (c) zeigt eine REM-Aufnahme der übertragenen Justiermarke in Photoresist AZ 1505 auf der Vorderseite der Photomaske.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode unterscheidet sich zu anderen Justiermethoden, z.B. [281, 282] in der Beleuchtung. Die diffraktiven Justiermarken, sowie die binären Phasenelemente zur Generierung des finalen Arrays, werden beide unter Verwendung des gleichen Gerätes und des gleichen optischen Systems belichtet. So werden auch die individuellen Eigenschaften der Mask Aligner Beleuchtung berücksichtigt, wie z.B. die Qualität der Beleuchtungstelezentrie. Damit können Justierfehler oder -abweichungen infolge unterschiedlicher Beleuchtungsoptiken reduziert werden.

4.3.2 Die Herstellung der doppelseitig-strukturierten Photomaske

Im Folgenden soll die Herstellung der doppelseitig strukturierten Photomaske, wie sie im Rahmen dieser Arbeit erfolgte, erläutert werden. Dafür sind in Abb. 51 die technologisch wichtigsten Schritte veranschaulicht zusammengefasst.

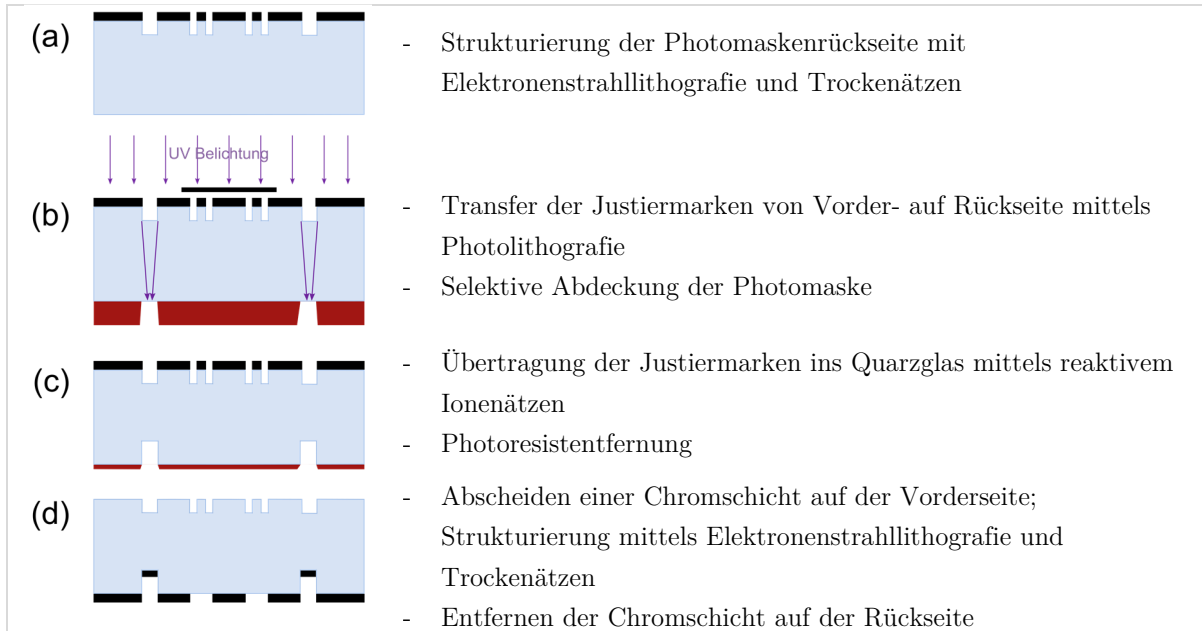


Abbildung 51: Technologische Schritte zur Herstellung der doppelseitigen Photomaske.

Die Herstellung der Photomaske startete mit der Strukturierung der Rückseite, wie in Abb. 51 (a) dargestellt. Zunächst wurden sowohl die Maskenstrukturen als auch die Strukturen zur Erzeugung der Marken als Resistmaske mittels Elektronenstrahlolithografie realisiert und anschließend mittels Trockenätzen in die darunterliegende Chrommaske übertragen. Die Chromschicht kann so als harte Maske für den Ätzprozess ins Quarzglas genutzt werden. Die Chrommaske gewährleistet eine Sicherstellung von steilen Flanken der Strukturen im Quarzglas. Auch hier wurde der Zusammenhang von Phasenschiebung und optischer Weglängendifferenz aus Formel (4.6) genutzt, um die Ätztiefe von 385 nm für die Verwendung einer späteren Belichtungswellenlänge von $\lambda = 365$ nm zu bestimmen.

Im nächsten Schritt wurden die Justiermarken generiert. Diese sind notwendig, um die Strukturierung der Vorderseite an der Rückseite auszurichten. Die Justiermarken wurden zunächst in 1 μm dicken Photoresist AZ 1505 auf der Vorderseite erzeugt. Dafür wurden die vorgesehenen diffraktiven Elemente der Rückseite einer Belichtungs-dosis von 0,13 mJ/cm² ausgesetzt (Abb. 51 (b)). Während diesem Belichtungsvorgang wurden alle weiteren Elemente abgedeckt, um sicherzustellen, dass nur die Justiermarken auf die Vorderseite in den Photoresist übertragen werden (Abb. 51 (b)). Anschließend wurden die Marken ins das darunterliegende Quarzglas geätzt. Da diese Strukturen im folgenden Lithografieschritt mittels Elektronenstrahl detektiert werden müssen, sollte die Ätztiefe für ein deutliches Rückstreusignal mindestens 300 nm betragen. Die letzten Herstellungsschritte der doppelseitigen Photomaske zeigt die Abb. 51 (d). Für die Strukturierung der Vorderseite wurde zunächst eine 96 nm dünne

Chromschicht inklusive 21 nm Chrom-Oxid-Schicht aufgebracht, die anschließend, gleich der Rückseite, mittels Elektronenstrahlenlithografie strukturiert wurde. Um nun die Position der vorderseitigen Elemente zu bestimmen, wurden die Justiermarken mittels Elektronenstrahl und Bilderkennung detektiert und daran die Belichtung ausgerichtet. Abschließend wurde die noch verbliebene Chromschicht auf der Rückseite entfernt. Diese wurde vorübergehend noch auf dem Substrat belassen, um die diffraktiven Elemente während der Übertragung der Justiermarken mechanisch zu schützen.

Die Ausrichtung von Vorder- und Rückseite, die mit den hier verwendeten Marken realisiert werden kann, liegt bei einer Genauigkeit besser als 1 μm , primär vorgegeben durch die mögliche Strukturdetektion der Elektronenstrahlolithografie. Dies ist vergleichbar mit einer Justiergenauigkeit von Jahn et al. [281].

Experimentelle Ergebnisse

Für die experimentelle Strukturübertragung des Arrays wurde eine Photomasken-Wafer-Distanz von 30 μm genutzt. Unterschiedliche Lackdicken wurden prozessiert, um die Funktionsfähigkeit der Photomaske zu testen. Mittels AZ 1505 wurde zunächst eine Teststrukturierung von 500 nm dünnem Lack durchgeführt. Die Strukturierung von 500 nm dicken AZ 1505 erforderte lediglich eine Dosis von 5,5 mJ/cm^2 . In weiteren Experimenten wurde Photoresist (AZ 9260) mit 2 μm und 10 μm Dicke ebenfalls erfolgreich strukturiert. Abbildung 52 zeigt die REM-Aufnahmen 10 μm tiefer Array Strukturen mit einem lokalen Zentrumsabstand von 50 μm .

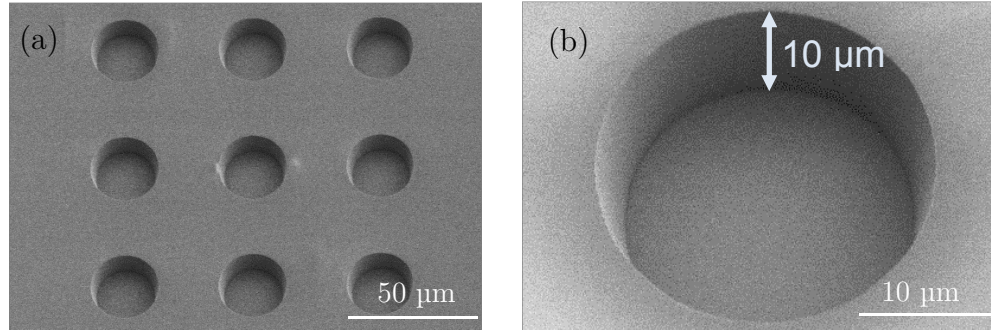


Abbildung 52: REM-Aufnahme der Arraystruktur in AZ 9260 als (a) komplettes Array sowie als (b) einzelnes Arrayelement. Der Durchmesser der einzelnen Kreiselemente beträgt 20 μm .

Für die Erzeugung der Strukturen in 10 μm dickem AZ 9260 war eine Belichtungs-dosis von 0,22 J/cm^2 notwendig. Die gleiche Struktur wurde schließlich auch in 30 μm dickem AZ 9260 realisiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 53 dargestellt.

Abbildung 53 zeigt gleichzeitig auch einen Vergleich der Strukturen, die einerseits mittels doppelseitig-strukturierter Photomaske in (b)+(c) und andererseits mit einer binären Amplitudenmaske in (e)+(f) erzeugt wurden. Die Struktur der konventionellen Photomaske befand sich auf der Vorderseite der Photomaske und ist in Abb. 53 (d) dargestellt. Da der Kontrast der REM-Aufnahmen in Abb. 53 (c) und (f) aufgrund der hohen Struktur-tiefe gering ist, zeigt die gestrichelte Linie in beiden Bildern den Übergang von Strukturwand zum durchentwickelten Boden, dem Silizium-Wafer. Da der Kippwinkel zur Probenanalyse bei beiden

Aufnahmen identisch war, kann somit eine relative Aussage über den Kantenwinkel getroffen werden.

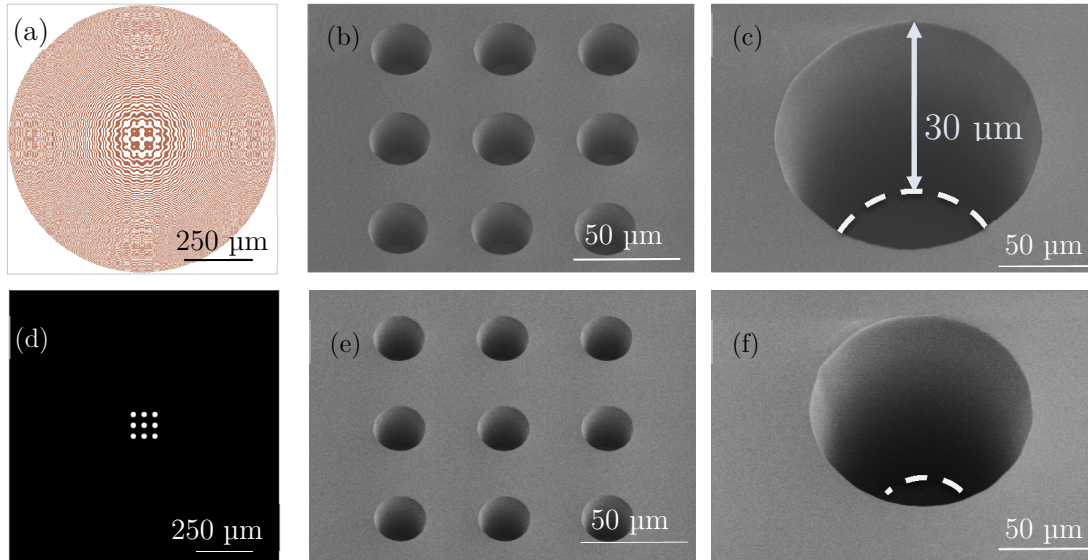


Abbildung 53: Strukturübertragung in 30 µm dicken AZ 9260 mittels (a) binären diffraktiven Elementes auf der Rückseite der Photomaske (analog Abb. 49(b)). Die Bilder (b) und (c) zeigen REM-Aufnahmen des vollständigen 3x3 Arrays mit lokalem Abstand von 50 µm und einem einzelnen Element davon. Die Photoresiststrukturen in (e) und (f) wurden mit einer konventionellen binären Amplitudenmaske erzeugt, deren Design in (d) zu sehen ist. (d) Die weißen Kreise entsprechen den Chromaperturen der Photomaske.

Ein Vergleich der Ergebnisse in Abb. 53 zeigt deutlich steilere Seitenwände der mittels doppelseitig-strukturierter Photomaske generierten Strukturen. Die Strukturen, die mittels konventioneller Amplitudenmaske realisiert wurden, verlaufen im Resist konisch nach unten, bzw. sind zum Teil nicht vollständig durchentwickelt.

Für die Strukturübertragung mittels doppelseitig-strukturierter Photomaske war eine Belichtungs-dosis von $0,5 \text{ J/cm}^2$ notwendig. Unter Verwendung der einfachen, binären Amplitudenmaske betrug die Belichtungs-dosis $1,05 \text{ J/cm}^2$. Mit der Benutzung einer 40 mm großen Irisblende als IFP entsprach das Winkelspektrum in beiden Fällen $v_{x/y} = \pm 1,7^\circ$. Das bedeutet, dass neben verbesserten Strukturflanken, die notwendige Belichtungszeit für die Strukturierung von 30 µm dickem Photoresist unter Verwendung der doppelseitig-strukturierten Photomaske ebenfalls halbiert werden konnte. Darüber hinaus bestätigen die experimentellen Ergebnisse die erfolgreiche Justage von Vorder- und Rückseite der Photomaske.

Mit diesem Wissen und der erfolgreichen Herstellung sowie experimentellen Durchführung kann das Design für eine doppelseitige strukturierte Photomaske erweitert und auf komplexere Anwendungen übertragen werden. Das vorliegende Design kann so z.B. auch auf einfache Art für andere Proximityabstände angepasst werden. Darüber hinaus kann eine doppelseitig strukturierte Photomaske auch verwendet werden, um definiert polarisiertes Licht auf der einen Seite zu erzeugen, um polarisationsabhängige Strukturen auf der Vorderseite zu belichten. Ferner wäre es auch möglich, Strukturen auf der Vorderseite mit definierten Einfallswinkel zu belichten, welcher z.B. durch eine definiert erzeugte Beugungsordnung der Rückseite hervorgeht.

Die lithografisch vorbereiteten Photoresiststrukturen können anschließend in weiteren Prozessschritten z.B. in das darunterliegende Material, Silizium, geätzt werden.

5 Alternative Belichtungsquelle

Entscheidend für eine erfolgreiche Strukturierung ist nicht nur die Verwendung einer optimierten Photomasken-Technologie, sondern auch die Photomaskenbeleuchtung, z.B. durch den Einsatz individueller Winkelspektren, wie in den vorausgegangenen Kapiteln bereits gezeigt werden konnte. Allerdings ergeben sich trotz optimiertem Beleuchtungssystem zur Verwendung der Quecksilberdampflampe als Belichtungsquelle verschiedene Einschränkungen, die in diesem Kapitel diskutiert werden. Mit dem Einsatz einer alternativen Belichtungsquelle können bestehende Limitationen überwunden werden.,

Neben den konventionellen Quecksilberdampflampen finden mittlerweile auch Leuchtdioden (kurz LED, engl. Light-emitting diode) oder auch Laser als Belichtungsquelle vereinzelt Einsatz in der Mask Aligner Lithografie. Im Rahmen dieser Arbeit bestand ein weiteres Ziel in der Untersuchung von Vorteilen, die eine Laserbeleuchtung bezüglich einer Verbesserung der Lichtausbeute für die Beugungslithografie ermöglicht.

In diesem Kapitel wird das Konzept, sowie die Anwendung einer Laser-basierten Beleuchtung im Mask Aligner vorgestellt. Es gelang, ein System zu entwickeln, mit dem flexible Winkelverteilungen der Photomaskenbeleuchtung möglich sind. Darüber hinaus konnten Belichtungszeiten bis zu einem Faktor von 20 im Vergleich zur Beleuchtung mittels Quecksilberdampflampe reduziert werden. Im Fokus der Entwicklung stand dabei weniger die Erhöhung der erreichbaren Auflösung, sondern zunächst das Design und der Aufbau des neuen Belichtungssystems mit dem Schwerpunkt auf der Erzeugung beliebiger Beleuchtungsspektren unter Verwendung eines Galvanometer-Scanners. Im Verlauf dieses Kapitels werden verschiedene Vor- und Nachteile des konventionellen sowie des neuen Beleuchtungssystems mittels Laser aufgezeigt.

In den Anfängen der Mask Aligner Lithografie wurden einfache Weißlichtquellen von Kinoleuchten oder Scheinwerfern der Fotografie verwendet [184]. Diese Lichtquellen waren günstig, besaßen eine einfache Handhabung und emittierten kollimiertes Licht mit einem Sonnenlichtspektrum. Mit der Vergrößerung der Substrate musste auch die Lichtquelle für eine großflächige Ausleuchtung angepasst werden. Die Glühlampe wurde durch leistungsstarke Quecksilberhochdruckbogenentladungslampen ersetzt.

Im Gegensatz zur Projektionslithografie für die Halbleiterindustrie entwickelte sich die Beleuchtungsquelle im Mask Aligner nicht wesentlich weiter. Bis heute werden vorrangig Quecksilberdampflampen als Beleuchtungsquelle im Mask Aligner verbaut. Ein ausschlaggebendes Kriterium hierfür ist eine relativ einfache Sicherstellung einer homogen-großflächige Ausleuchtung der kompletten Photomaske unter Verwendung dieser Lampe. Innerhalb der letzten zehn Jahre wurde, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, die Homogenität sowie die Telezentrie der Photomaskenbeleuchtung optimiert, sodass die Herstellung hoch aufgelöster Strukturen möglich ist [9].

Nichtsdestotrotz hat die Nutzung von Quecksilberdampflampen verschiedene Nachteile. Baulich betrachtet sind Quecksilberdampflampen relativ groß und sperrig. Darüber hinaus

bergen diese Quellen immer eine gewisse Gefahr aufgrund des Quecksilbergehaltes. Ein weiterer Nachteil ist eine relativ geringe Standzeit der Lampen von 1500 Stunden (vgl. OSRAM HBO 1000W/DHL [283]), sodass ein regelmäßiges Warten und Wechseln notwendig ist. Das Ein- und Ausschalten nach Bedarf für einzelne Belichtungen ist ebenfalls nicht möglich, da die Quecksilberdampflampen eine ca. 20- bis 30-minütige Aufwärmzeit benötigen.

Im Allgemeinen sind Quecksilberdampflampen in der Mask Aligner Lithografie relativ ineffizient, da nur ein Bruchteil der Leistung als Bestrahlungsstärke zur Photomaskenbeleuchtung genutzt werden kann. Bei dem genutzten Mask Aligner beträgt die Leistung unter Nutzung der i-Linie in der Photomaskenebene mit $d = 220$ mm ca. 1 % der elektrischen Lampenleistung von $P = 1000$ W. Bei der Erzeugung hoch aufgelöster Strukturen, bei denen ein sehr kleines Winkelspektrum benötigt wird, kann dies sehr lange Belichtungszeiten bedeuten. Wie im Kapitel 3.3.1 bereits beschrieben, wird im konventionellen Beleuchtungsaufbau das Winkelspektrum durch eine Blende (IFP) im Strahlengang definiert, wobei kleine Winkelspektren mit sehr kleinen Öffnungen einhergehen. Durch eine kleine Öffnung, z. B. eine Irisblende mit 5 mm Durchmesser für die Definition eines Winkelspektrums von $v_{x/y} = \pm 0,2^\circ$, wird die Bestrahlungsstärke auf lediglich 0,5 % verringert, bezogen auf eine i-Linien Beleuchtung ohne IFP, entsprechend $v_{x/y} \approx \pm 3,3^\circ$. Diese enorme Reduzierung der nutzbaren Bestrahlungsstärke erhöht die Belichtungszeiten auf ineffiziente Werte.

Unter Verwendung der konventionell genutzten Quecksilberdampfampe lassen sich diese Nachteile aufgrund des ausgedehnten Quellvolumens und der isotropen Abstrahlung nicht überwinden.

Der Einsatz von Leuchtdioden als Beleuchtungsquelle ermöglicht verschiedene Verbesserungen der genannten Beeinträchtigungen einer Quecksilberdampfampe [284]. Ein wesentlicher Vorteil von Leuchtdioden ist die lange Standzeit ohne Wartung, sowie ein Ein- und Ausschalten ohne Aufwärmzeiten je nach Bedarf. Allerdings reicht die Leistung einer einzelnen LED für Belichtungen nicht aus, sodass mehrere LEDs zu einer Einheit zusammengefasst werden müssen. LED-Module als Beleuchtungsquelle sind noch nicht etabliert, aber bereits für Mask Aligner kommerziell verfügbar [285, 286]. Aber auch bei diesen Systemen kann das Winkelspektrum der Photomaskenbeleuchtung lediglich mittels einer Blende (IFP) im Strahlengang definiert werden. Dies bedeutet weiterhin für sehr kleine Winkelspektren einen Verlust bzw. eine Verringerung der nutzbaren Bestrahlungsstärke.

In diesem Kapitel wird eine Beleuchtungsalternative mittels Laser vorgestellt, die eine flexible Einstellung des Winkelspektrums der Beleuchtung ermöglicht, sodass auch für kleine Winkelspektren die Bestrahlungsstärke unverändert genutzt werden kann. Ähnlich der Verwendung von LEDs bietet auch ein Laser verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten gegenüber der Verwendung einer Quecksilberdampfampe, die im folgenden Abschnitt genauer thematisiert werden.

5.1 Der Laser als Belichtungsquelle

Die Verwendung eines Lasers als Beleuchtungsquelle in einem Mask Aligner ist bisher kommerziell nicht gebräuchlich. Nichtsdestotrotz zeugen bereits einzelne Arbeiten von der Verwendung eines Lasers im Mask Aligner, wobei über die Integration ins Beleuchtungssystem im Detail wenig beschrieben wird. Partel et al. [287] nutzten z.B. einen Excimerlaser mit einer Wellenlänge von 193 nm für Kontakt- und Proximitybelichtungen. Die Homogenisierung der Intensitätsverteilung erfolgte mittels Mikrolinsenarray. Über die genaue Aufweitung des Laserstrahls für eine homogene Ausleuchtung von 6 Zoll großen Wafern wurde keine Angabe gemacht. Das Team realisierte 2 μm breite Strukturen bei einem Maske-Substrat-Abstand von 10 μm . Unter Berücksichtigung des in Formel (3.1) gegebenen Zusammenhangs hätte sogar eine noch bessere Auflösung und Strukturgrößen von etwa $\Delta x = 1,4 \mu\text{m}$ realisierbar sein können. In einer weiteren Publikation [288] über die Herstellung von Bragg-Gittern ist ebenfalls die Rede von einem nachgerüsteten HeCd-Laser ($\lambda = 325 \text{ nm}$) in einem Mask Aligner. Allerdings enthält diese Veröffentlichung keinerlei Informationen über die genaue Einbindung des Lasers als Belichtungsquelle.

Als potenzielle Belichtungsquellen stehen unterschiedlichste Lasertechnologien (z.B. Gas-, Festkörperlaser) mit verschiedenen Wellenlängen und verschiedenen Leistungen zur Verfügung, die mittels unterschiedlicher Konzepte zur Strahlaufweitung (z.B. refraktiv, diffraktiv) in das Mask Aligner Beleuchtungssystem integriert werden könnten. Für lithografische Belichtungen wäre ein CW-Laser (engl. Continuous Wave Laser, Dauerstrichlaser), der ununterbrochen und konstante Laserstrahlung emittiert, am besten geeignet. Allerdings sind UV ($\lambda = 380\text{-}200 \text{ nm}$) oder DUV ($\lambda = 200\text{-}100 \text{ nm}$) CW-Laser aktuell nur mit nominellen Ausgangsleistungen kleiner 1 W erhältlich. Da der Strahl für die Mask Aligner Lithografie noch stark aufgeweitet werden muss, könnten in bestimmten Anwendungen längere Belichtungszeiten als im Vergleich zur momentan genutzten Quecksilberdampfampe entstehen. Eine Alternative zum CW-Laser bieten gepulste Laser mit hohen Frequenzen. Ein weiteres wichtiges Kriterium der Laserstrahlung stellt dann die Pulsdauer dar. Ein kurzer Puls ist in der Regel sehr energiereich. Pico- oder Femtosekundenlaser sind für die Mask Aligner Lithografie nicht notwendig bzw. weniger geeignet, da es aufgrund der hohen Pulsspitzenleistung zu Schäden an den verwendeten Glasoptiken kommen kann. Je kürzer außerdem der Puls, umso größer die Bandbreite der Laserstrahlung. Da für die Mask Aligner Beleuchtung Nanosekunden-Pulse ausreichend sind, kann von einer geringen Bandbreite profitiert werden, die für hochauflösende Strukturierungen notwendig ist. Ausgehend von Formel (3.1) gilt, je geringer die Wellenlänge der Belichtungsquelle gewählt wird, desto höher kann die theoretisch erreichbare Auflösung sein. Weiterhin kann mit einer hohen Ausgangsleistung die Belichtungszeit verringert werden.

Ein weiterer Vorteil besteht für polarisationsabhängige Anwendungen, da aufgrund der polarisierten Laserstrahlung kein zusätzlicher Polarisator im Strahlengang notwendig ist. So kann eine weitere Reduzierung der Bestrahlungsstärke vermieden werden.

Die Verwendung eines Lasers bedeutet allerdings auch einige neue Herausforderungen. Laserstrahlung kann eine Gefährdung für den Menschen darstellen. Bestimmte Wellenlängen in Verbindung mit hohen Intensitäten können so z.B. zu irreparablen Schäden des Auges oder der

Haut führen. Somit muss für die entsprechende Sicherheit während der Belichtungen gesorgt werden. Da der Laserstrahl im Rahmen der Beugungslithografie für großflächige Photomaskenbeleuchtungen aufgeweitet wird, kann die Laserschutzklasse für die Belichtungen selbst verringert werden.

Neben der Strahlaufweitung für großflächige Belichtungen spielt die Homogenisierung des Beleuchtungsfeldes der Photomaske eine bedeutende Rolle, denn die kohärente Laserstrahlung verursacht unerwünschte lokale Intensitätsschwankungen, sogenannte Speckle [289]. Zur Reduzierung dieser Speckle gibt es verschiedenste Ansätze, wie z. B. die Verwendung eines (bewegten) Diffusors oder eines streuenden Elementes mit rauer Oberfläche im Strahlengang [289 - 292]. Wird zur Homogenisierung beispielsweise ein diffraktiver Diffusor verwendet, so muss die von diesem Bauteil oft generierte nullte Beugungsordnung ebenfalls minimiert werden. Je nach Intensität könnte diese sonst zu einem unerwünscht belichteten Bereich in der Mitte des Wafers führen.

5.2 Das Beleuchtungssystem mit integriertem Laser

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein frequenzverdreifachter Dioden-gepumpter Festkörperlaser der Firma Innolas, Typ Nanio355-3V-150, als Beleuchtungsquelle in einen Mask Aligner der Firma SUSS MicroTec, Typ MA8/BA8 integriert. Die nominelle Ausgangsleistung des Lasers beträgt $P = 3 \text{ W}$ mit einer Pulsfrequenz von $f = 150 \text{ kHz}$. Dieser Laser emittiert gepulste Strahlung mit einer Wellenlänge von $\lambda = 355 \text{ nm}$ ($\Delta\lambda = 400 \text{ pm}$) und einer Pulslänge von $\tau < 33 \text{ ns}$.

Die Wellenlänge des Lasers wurde gewählt, da sie nahe der i-Linie der Quecksilberdampflampe ($\lambda = 365 \text{ nm}$) liegt. So konnten vorhandenen Photoresiste verwendet und auf aufwändige neue Tests verzichtet werden. Darüber hinaus können Teile des Beleuchtungssystems für beide Belichtungsquellen verwendet werden.

Mit einem nominellen Strahldurchmesser von $d = 0,85 \text{ mm}$ am Austritt des Lasers besteht eine sehr hohe Bestrahlungsstärke, von der verschiedenen Gefahren ausgehen. Der verwendete Laser wird der Laserklasse 4 zugeordnet. Das Gesamtkonzept des Beleuchtungsaufbaus ist allerdings so aufgestellt, dass nach einer Justage des Laserstrahls, dieser vollständig gehaust, somit abgeschirmt ist und keine erhöhte Gefahr für den Benutzer des Mask Aligners ausgeht. Durch die Strahlaufweitung mittels eines diffraktiven Diffusors ergibt sich eine Photomaskenbeleuchtung mit reduzierter Bestrahlungsstärke, sodass der finale Aufbau mit der Laserklasse 1 deklariert werden kann. Daher kann der Laser als Beleuchtungsquelle im Mask Aligner ohne weitere Vorkehrungen im Reinraum der Photolithografie verwendet werden.

Für das neue Beleuchtungssystem mit dem Laser als Belichtungsquelle wurden drei primäre Ziele festgelegt:

- (1) eine flexible Definition des Winkelspektrums der Photomaskenbeleuchtung,
- (2) eine großflächige und homogene Ausleuchtung der Photomaskenebene im Durchmesser von 220 mm , sowie
- (3) eine telezentrische Beleuchtung der Photomaske.

Darüber hinaus soll sekundär eine höhere Leistung (im Vergleich zur konventionellen Beleuchtung mit Quecksilberdampfampe) auf der Photomaske sowie deren polarisierte Beleuchtung umgesetzt werden.

Für die Realisierung dieser Ziele wurden verschiedene neue Elemente in die Beleuchtungsoptik integriert. Abbildung 54 (a) zeigt eine Übersicht der schematischen Anordnung der optischen Elemente des neuen Beleuchtungssystems. Der genaue Aufbau wurde vorab mittels einer Computer-gestützten Konstruktion entworfen. Im drei-dimensionalen Entwurf in Abb. 54 (b) sind die wichtigsten neuen Komponenten maßstabsgetreu dargestellt. Dabei ist bereits erkennbar, dass Scanner, Kollimationslinse, Diffusor sowie die Fourierlinse auf einer austauschbaren optischen Schiene platziert sind, sodass ein einfacher Wechsel mit dem konventionellen Beleuchtungssystem möglich ist. Das neue System wurde so gestaltet, dass dieselbe Feldlinse in beiden Beleuchtungssystemen verwendet werden kann, um die telezentrische Beleuchtung der Photomaske sicherzustellen.

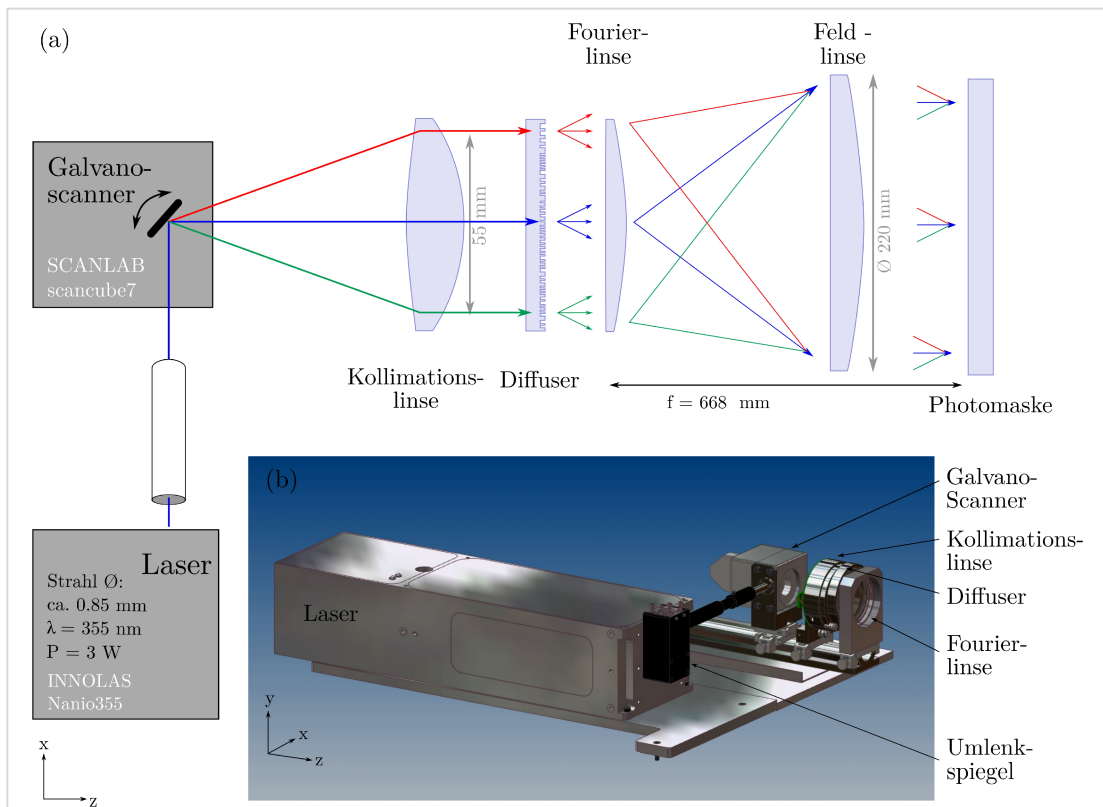


Abbildung 54: (a) Schematische Anordnung der optischen Elemente, die für das Beleuchtungssystem mit Laser als Beleuchtungsquelle verwendet werden. (b) Computer-basierte Konstruktion des neuen Beleuchtungssystems zeigt maßstabsgetreuen Aufbau der neuen Beleuchtungsoptik.

(1) Eine flexible Definition des Winkelspektrums der Photomaskenbeleuchtung

Im Beleuchtungssystem unter Verwendung der Quecksilberdampfampe findet die Selektion und Wahl des Winkelspektrums der Photomaskenbeleuchtung mittels IFP statt, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben. Neben dem zusätzlichen Fertigungsaufwand für jede neue Winkelkonfiguration hat die Verwendung einer derartigen Metallblende den weiteren Nachteil der signifikanten Verringerung der Bestrahlungsstärke insbesondere für kleine Beleuchtungswinkel auf der

Photomaske. Die verbleibende Bestrahlungsstärke in der Maskenebene ist stark abhängig von deren Größe. Diese ist umso geringer, je kleiner die IFP-Öffnung ist. Dies wiederum kann zu ineffizienten Belichtungszeiten führen. Die Verwendung einer IFP mit einem Durchmesser kleiner als 5 mm ist nicht praktikabel. Aus den Brennweitenbeziehungen des konventionellen Aufbaus ergibt sich daraus ein minimales Winkelspektrum der Photomaskenbeleuchtung von $v_{x/y} = \pm 0,2^\circ$. Je größer die Restdivergenz, desto geringer ist die minimale Auflösung, die mittels Schattenwurf lithografie erreicht werden kann.

Die Definition des Winkelspektrums wird im neuen Beleuchtungssystem mit einem Galvano-Scanner (Scanlab, SCANcube 7) realisiert. Ähnlich der bereits etablierten Beleuchtungstechnik der Projektionslithografie, bekannt als „FlexIllu“, „FlexRay“ oder „Freeform Illumination“ [15, 293], können nun im Mask Aligner auf einfache Weise individuelle Winkelspektren der Photomaskenbeleuchtung schnell verändert und definiert werden. Dies erlaubt individuelle Beleuchtungen und somit auch erweiterte Optimierungsmöglichkeiten der Maskengeometrien unter Berücksichtigung der Beleuchtungsfreiheitsgrade. Mit Hilfe einer Software können die Beleuchtungswinkel v_x und v_y der Photomaske im Mask Aligner nun grafisch am Computer definiert werden. Die Spiegelbewegung des Scanners realisiert das definierte Muster, welches so anschließend die Kollimationslinse und folglich den Diffusor beleuchtet. Abbildung 55 zeigt den Zusammenhang zwischen Scan-Muster und dem resultierenden Winkelspektrum der Photomaskenbeleuchtung.

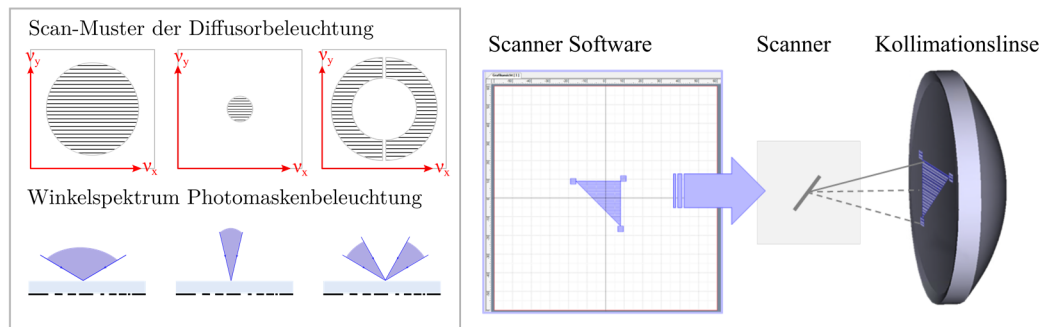


Abbildung 55: Die Steuerung des Galvano-Scanners erfolgt computergestützt. Das Winkelspektrum kann grafisch in einer Software definiert werden und beleuchtet anschließend die Kollimationslinse, gefolgt vom Diffusor. Die scannende Definition der Winkelspektren wird durch die linierte Darstellung der Geometrien veranschaulicht. Innerhalb der Software kann die Dichte der Linien/des Füllmusters variiert werden.

Mit dem neuen Beleuchtungssystem zur Nutzung des Lasers als Lichtquelle werden keine neuen IFPs zur Definition des Winkelspektrums mehr benötigt. Daher fallen die zusätzlichen Fertigungskosten sowie -zeiten für die Metallblenden weg. Ferner kann von der gleichen Bestrahlungsstärke der Photomaskenbeleuchtung unabhängig von der Wahl des Winkelspektrums profitiert werden. Je nach Winkelspektrum wird die Laserintensität in die einzelnen Beleuchtungswinkel umverteilt, wobei sich die Summe über alle Winkel und somit die Bestrahlungsstärke auf der Photomaske nicht ändert. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber der konventionellen Beleuchtungsmethode. Insbesondere für eine hochauflösende Lithografie, bei der hochkollimierte Photomaskenbeleuchtungen mit sehr kleinen Winkelverteilungen notwendig sind, ist dies von großem Nutzen.

Der Aufbau von Scanner, Kollimationslinse und Diffusor ist so gestaltet, dass mit dem Scanner die Apertur der Kollimationslinse voll ausgeleuchtet werden kann. Aus geometrischen Abhängigkeiten ergeben sich so maximale Beleuchtungswinkel von bis zu $v_{x/y} = \pm 2,36^\circ$, die zur Photomaskenbeleuchtung verwendet werden können. Das kleinstmögliche Winkelspektrum der Photomaskenbeleuchtung mit dem neuen Beleuchtungssystem ergibt sich nur ohne Scanbewegung. Eine mögliche Stellung der Scannerspiegel ist dann so ausgerichtet, dass der Laserstrahl der optischen Achse folgt. Die Beleuchtung des Diffusors mit einem Strahldurchmesser von 0,85 mm verursacht eine theoretische Restdivergenz von $v_{x/y} = 0,04^\circ$, die sich aufgrund der Brennweitenbeziehungen ergibt. Dies entspricht ungefähr einem Winkelspektrum wie unter Verwendung einer 1 mm großen IFP (Durchmesser) mit der Quecksilberdampfampe als Beleuchtungsquelle, wobei die Anwendung einer so kleinen IFP-Apertur hinsichtlich der sich ergebenden Belichtungszeiten nicht praktikabel ist.

Damit das vom Scanner generierte Winkelspektrum adäquat in der Photomaskenebene umgesetzt werden kann, muss u. a. dafür gesorgt werden, dass, unabhängig vom gewählten Winkelspektrum, der Laserstrahl für die verschiedenen Scan-Konfiguration im weiteren Strahlenverlauf parallel der optischen Achse folgt und der Diffusor senkrecht beleuchtet wird. Hierfür wurde die bereits erwähnte Kollimationslinse, die im Strahlengang dem Scanner folgt, mittels Optikdesignsoftware Zemax optimiert. Abbildung 56 zeigt die in der Software realisierte Konfiguration aus Scanner-Spiegeln und Kollimationslinse, wobei die unterschiedlichen Farben unterschiedliche Strahlablenkungen durch verschiedenen Spiegelstellungen bedeuten.

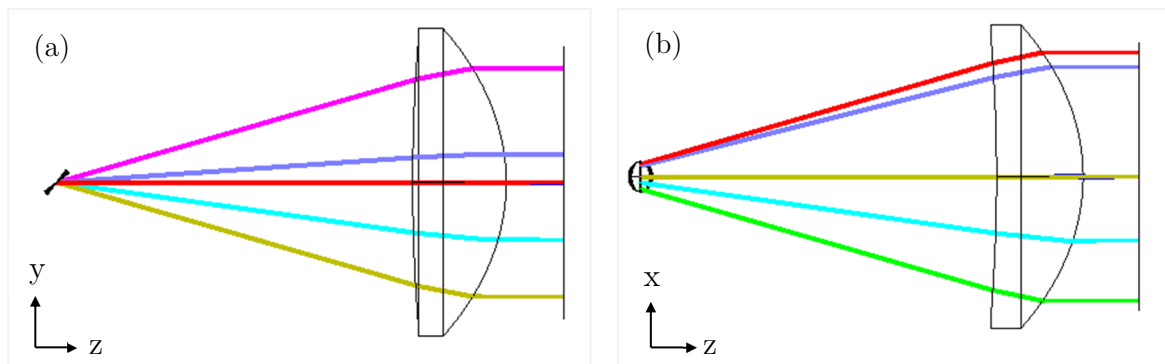


Abbildung 56: Die Optimierung der Kollimationslinse erfolgte für verschiedene Ablenkpositionen der Spiegel des Galvano-Scanners, die optisch durch die unterschiedlichen Farben unterscheidbar sind. Die Bilder (a) und (b) zeigen zwei Ansichten der Linsenkonfiguration. Die Scanner zugewandte Linsenfläche ist zylindrisch und die abgewandte Fläche asphärisch.

Für das Optikdesign wurde ein Durchmesser von 0,85 mm für den Laserstrahl verwendet. Die zwei Spiegel des Scanners haben einen Abstand von 9,98 mm in y-Richtung voneinander. Durch diese Anordnung erfolgt ein Strahlversatz von Eintritts- zu Austrittsfläche des Scanners. Somit ergeben sich zur Linse verschiedene Brennweiten in x- und y-Richtung. Dies wird durch eine zylindrische Linsenfläche der dem Scanner zugewandten Seite kompensiert. Für die dem Scanner abgewandte Linsenfläche ergibt sich nach der Optimierung eine asphärische Form. So kann auch für Laserbeleuchtungen unter großen Ablenkungswinkeln, d.h. in den Randbereichen der Linse, sichergestellt werden, dass der nachfolgende Diffusor senkrecht beleuchtet wird.

Galvano-Scanner, Kollimationslinse sowie der Diffusor mit dazugehöriger Fourierlinse können als eine Einheit betrachtet werden, die im neuen Beleuchtungssystem für eine Laserbeleuchtung aufeinander abgestimmt und optimiert wurden. Im experimentellen Aufbau, zu sehen in Abb. 57, wurden diese Elemente auf eine optische Schiene montiert. Dabei wurden die Kollimationslinse sowie der Diffusor in einer Baugruppe zusammengefasst. Dies reduziert eine mögliche Verkippung von Diffusor und Kollimationslinse zueinander auf ein Minimum.

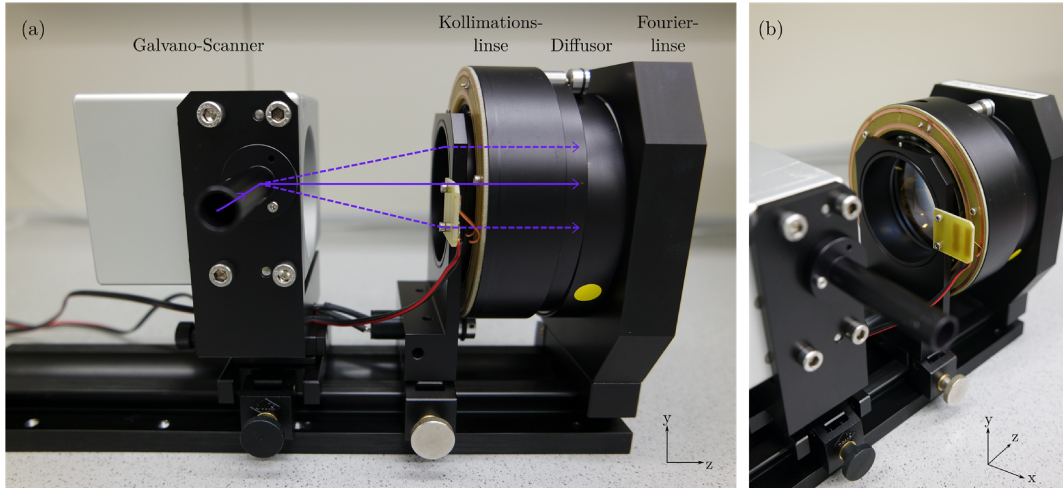


Abbildung 57: (a) Optik-Modul auf austauschbarer Schiene umfasst (v.li. n. re.) Galvano-Scanner, Kollimationslinse, Diffusor und Fourierlinse. Die lila-farbenen Linien zeigen mögliche Strahlenverläufe mit drei verschiedenen Ablenkenszenarien der Galvo-Spiegel. (b) Die Apertur der Kollimationslinse begrenzt die größtmöglichen Beleuchtungswinkel der Photomaske. Über die Schleifkontakte wird die Rotation des Diffusors angetrieben.

Neben den Elementen, die sich auf der austauschbaren optischen Schiene in Abb. 57 befinden, gehören der Laser als Lichtquelle sowie die Feldlinse als zwei weitere wichtige Komponenten zum neuen Beleuchtungssystem. Letztere befindet sich direkt oberhalb der Photomaske und wird für beide Beleuchtungskonzepte verwendet.

(2) Realisierung einer großflächigen und homogenen Ausleuchtung der Photomaskenebene im Durchmesser von $d = 220$ mm

Für eine großflächige Ausleuchtung muss der Laserstrahl mit einem Durchmesser von 0,85 mm auf 220 mm aufgeweitet werden. Dies ermöglicht eine vollflächige Mask Aligner Lithografie von bis zu acht Zoll großen runden Substraten. Im Allgemeinen kann eine Strahlaufweitung zum Beispiel mittels refraktiven oder diffraktiven Elementen erfolgen [294 - 296]. Zusätzlich zur Strahlaufweitung muss die gaußförmige Intensitätsverteilung des Laserstrahlprofils in ein sogenanntes Top-Hat Profil umgewandelt werden, sodass die großflächige Ausleuchtung homogen über die gesamte Photomaske erfolgt und kein Intensitätsabfall zum Rand besteht.

Für das neue Beleuchtungssystem der Photomaskenbeleuchtung wurde ein diffraktiver Ansatz zur Strahlaufweitung sowie zur Homogenisierung des Intensitätsprofils gewählt. Das Prinzip der Strahlaufweitung basiert auf einem diffraktiven Diffusor, dessen Fouriertransformierte eine kreisförmige Intensitätsverteilung mit einem Durchmesser von 220 mm in der Photomaskenebene generiert. Abbildung 58 zeigt das Konzept des Diffusors, welcher insgesamt aus ca. 8000 computergenerierten Hologrammen (engl. Computer-generated

hologram, CGH) besteht, um eine Kreisfläche des gesamten Diffusors mit $d = 75$ mm Durchmesser auszufüllen. Jedes einzelne CGH ist ein binäres, quadratisches Phasenelement (Abb. 58 (a)) mit einer Fläche von $0,72 \text{ mm}^2$, sodass die Kantenlänge etwa der Größenordnung des Strahldurchmessers entspricht.

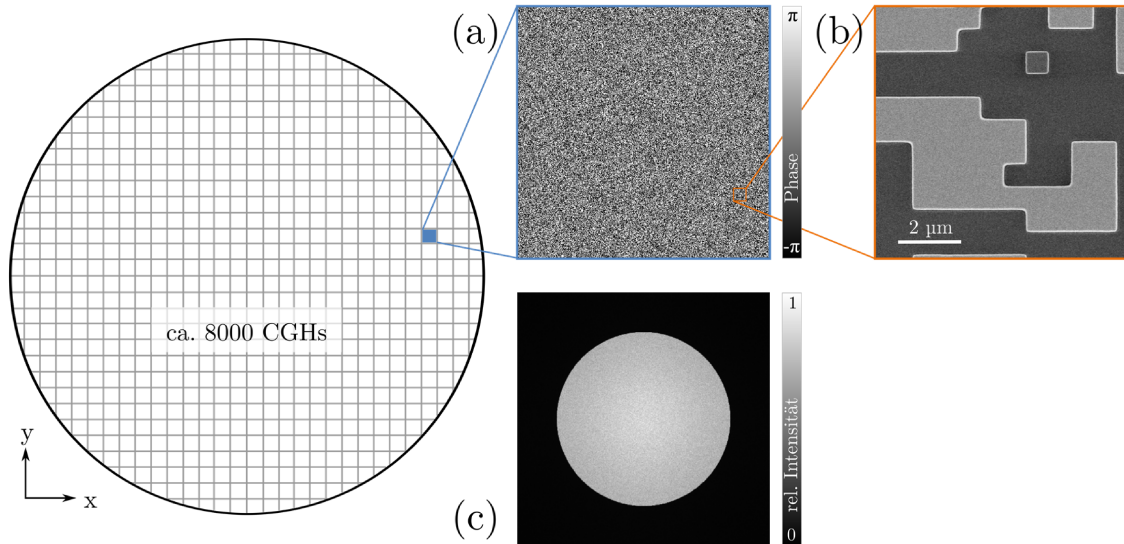


Abbildung 58: Designskizze des Diffusors bestehend aus etwa 8000 einzelnen CGHs, mit binären Phasenverteilungen, wie in (a) dargestellt. (b) Die REM Aufnahme zeigt einen Ausschnitt des hergestellten Diffusors, bzw. eines CGHs, wobei die dunklen Bereiche die tief geätzten Bereiche in Quarzglas darstellen. (c) Die Überlagerung hinreichend vieler Fouriertransformierten der einzelnen CGHs ergibt eine homogene, kreisrunde Intensitätsverteilung in der Maskenebene.

Jedes einzelne CGH wurde mit einem iterativen Fourier-Transformations-Algorithmus (engl. Iterative Fourier Transformation Algorithm, IFTA) [297, 298] berechnet. Abbildung 59 zeigt das Prinzip des verwendeten IFTAs mit den implementierten Randbedingungen in der Element- bzw. CGH-Ebene sowie in der Bild- bzw. Photomaskenebene.

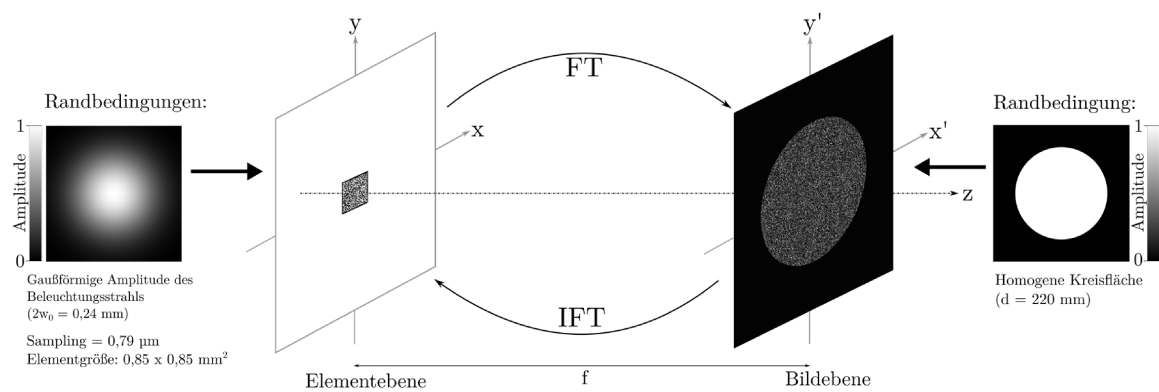


Abbildung 59: Ablaufschema des IFTAs: Der Algorithmus startet in der Bildebene mit einer inverse Fourier-Transformation. Dabei wird die Zielfunktion einer homogenen Amplitudenverteilung einer Kreisfläche mit zufälliger Phasenverteilung zurück in die Elementebene propagiert. In der Elementebene wird die Amplitudenverteilung gegen die gaußförmige Laserstrahlbeleuchtung ersetzt und anschließend wieder zur Bildebene propagiert, wo die Amplitudenverteilung erneut gegen die der Randbedingung/Zielfunktion ersetzt wird. Für den Algorithmus wurden 1000 Iterationen verwendet, da mehr Iterationen keine qualitative Verbesserung der gewünschten Amplitudenverteilung ergaben.

In der Bildebene wurde die zu generierende Zielfunktion der Amplitudenverteilung festgelegt, die von der gewünschten Intensitätsverteilung in der Photomaskenebene abgeleitet wurde. Die Zielfunktion soll mittels einer reinen Phasenfunktion, generiert vom CGH, im Fernfeld erzeugt werden. Während der Optimierung findet in der Elementebene schrittweise eine Quantisierung der Phasenfunktion auf zwei Werte statt. Die binäre Phasenfunktion kann im Anschluss an die iterative Optimierung mittels Dünne Elemente-Approximation in ein binäres Phasenelement zur Fertigung überführt werden. Die Anzahl der Phasenwerte wird ebenfalls eingangs der Optimierung als eine Randbedingung in der Elementebene festgelegt. Ein zweites Fertigungskriterium betrifft die minimale Strukturgröße für die Herstellung, die als Pixelgröße (Sampling) der Elementebene definiert wird. Die CGH-Beleuchtung mittels Laser erfolgt senkrecht, sichergestellt mittels der vorausgehenden Kollimationslinse. Das Intensitätsprofil des Laserstrahls entspricht dabei einer Gaußverteilung. Für die iterative CGH Berechnung wird die abgeleitete Amplitudenverteilung als weitere Randbedingung ebenfalls in die Elementebene integriert, wie in Abb. 59 dargestellt. Die beschriebenen Randbedingungen wurden für die Berechnung jedes einzelnen der rund 8000 Diffusor Elemente verwendet. Der einzige Unterschied zwischen den einzelnen CGH Berechnungen besteht in der Ausgangsphase des Startelementes des IFTA. Allen CGH Elementen liegt eine unterschiedliche Phasenverteilung als Startkonfiguration in der Bildebene zu Grunde. Für jedes DOE wurde eine unterschiedliche pseudo-zufällige Phasenverteilung generiert, sodass sich letztendlich alle finalen Diffusor-Elemente voneinander unterscheiden. Allerdings handelt es sich um Pseudozufallsverteilungen, da die Erzeugung auf einem deterministischen Zufallsgenerator bzw. Algorithmus basiert. Die einzelnen Phasenverteilungen wurden immer mit einem anderen Startwert (engl. seed) erzeugt. Unter Verwendung des gleichen „seeds“ kann man die einzelnen Verteilungen reproduzieren. Aufgrund der möglichen Reproduzierbarkeit, spricht man von pseudo-zufällig.

Jedes einzelne Diffusor Element, egal welches vom Laser beleuchtet wird, weitet den Strahldurchmesser auf die definierte Kreisfläche mit $d = 220$ mm Durchmesser auf. Die Beleuchtung eines einzelnen CGHs würde mit der gewählten Methode allerdings keine ausreichende Homogenität der Photomaskenbeleuchtung generieren. Aufgrund der Kohärenzeigenschaft des Lasers entsteht ein körniges Interferenzmuster mit einer zufälligen Verteilung von Intensitätsminima und –maxima [289] in der Bildebene, wie in Abb. 60 dargestellt.

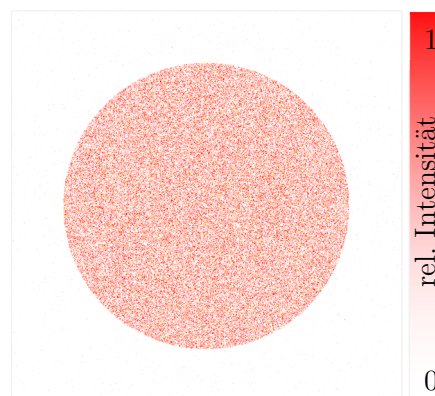


Abbildung 60: Intensitätsverteilung zeigt ausgeprägtes Speckle Muster der ausgeleuchteten Kreisfläche ($\varnothing 220$ mm) in der Photomaskenebene bei Beleuchtung eines einzelnen CGHs.

Eine Bewertung des Speckle Musters kann mit Hilfe des Michelson-Kontrastes K ermittelt werden. Mit

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5.1)$$

kann das Verhältnis aus den Intensitätsminima I_{\min} und -maxima I_{\max} beschrieben und berechnet werden. Der Kontrast des Speckle Musters der Kreisfläche in Abb. 60 beträgt $K = 0,999$. Ein Speckle Kontrast von $K = 1$ bedeutet eine voll ausgebildete Interferenzstruktur. Je kleiner also der Wert des Kontrastes, umso geringer der Einfluss der Speckle auf das Belichtungsergebnis. An dieser Stelle würde die Beleuchtung eines einzelnen CGHs im Diffusor eine sehr ausgeprägte granulare Struktur und somit eine unzureichende Homogenität für die lithografische Belichtung bedeuten.

Zur Reduzierung von Speckle gibt es verschiedene Ansätze und Methoden [289]. Im Allgemeinen können Speckle durch zeitliches Mitteln verschiedener, unkorrelierter Specklemuster oder durch die Reduzierung der zeitlichen oder räumlichen Kohärenz der Beleuchtung erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Reduzierung der Speckle mittels zeitlicher Mittelung unterschiedlich erzeugter Intensitätsverteilungen während einer Belichtung realisiert. Bei der Verwendung großer Winkelspektren für die Photomaskenbeleuchtung wird ein großer Bereich des Diffusors mittels Scanner belichtet. Dabei ergibt sich eine homogene, Speckle-reduzierte Überlagerung der erzeugten Fouriertransformierten in der Photomaskenebene. Wird allerdings nur ein kleines Beleuchtungsspektrum verwendet, ggf. ohne Scanfunktion, würde nur ein einzelnes CGH beleuchtet werden und somit keine ausreichende Homogenisierung der Photomaskenbeleuchtung erreicht. Aus diesem Grund rotiert der Diffusor zusätzlich exzentrisch, sodass viele verschiedene CGHs während einer Belichtung beleuchtet werden und die Überlagerung ebenfalls eine homogene Belichtung gewährleistet. Für die Umsetzung der exzentrischen Rotation wird der Diffusor außeral axial mit einem Versatz von 5 mm zur optischen Achse gelagert und rotiert mit einer Drehzahl n_1 , während ein äußerer Ring zusätzlich mit einer Drehzahl n_2 rotiert. Das Prinzip ist in Abb. 61 skizziert.

Die minimale Drehzahl n_2 des Diffusors beträgt dabei 60 Umdrehungen pro Minute, wobei die Drehgeschwindigkeiten des äußeren Rings und die des Diffusors getrennt voneinander eingestellt werden können. Je höher die Anzahl der beleuchteten Diffusor-Elemente, umso homogener ist die Beleuchtung der Photomaske. Auf diese Weise kann der Einfluss der Laser Speckle auf ein Minimum reduziert werden. Eine Überlagerung von 1000 verschiedenen Fouriertransformierten in der Photomaskenebene ergibt bereits eine Verringerung des Michelson-Kontrastes auf $K = 0,08$. Dies

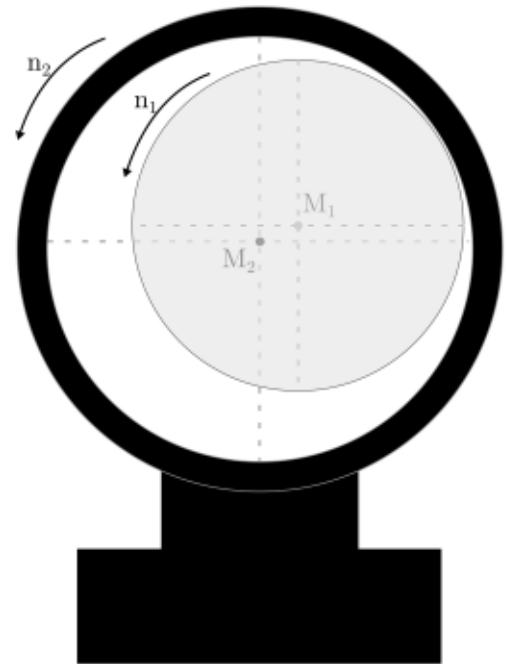


Abbildung 61: Skizzierte Anordnung des exzentrisch rotierenden Diffusors (grau).

entspricht einer Intensitätsschwankung um etwa 15,6 %. Weitere Überlagerungen von 3000 und 8000 Elementen verbessern die Homogenität auf $K = 0,076$ bzw. $K = 0,048$. Dabei kann die Intensitätsschwankung des Speckle-Musters auf 13 % bzw. 10% reduziert werden.

Die Herstellung des Diffusors erfolgte mittels Elektronenstrahlolithografie auf einem 1 mm dicken und 4 Zoll großen Quarzglas-Wafer. Eine für den Prozess aufgebrauchte Chromschicht übernimmt die Funktion einer Maske für den Strukturierungsvorgang. Dafür wurde die Struktur zunächst mittels Elektronenstrahlolithografie und anschließendem Trockenätzen in die Chromschicht übertragen. Daraufhin wurde die Chrom-Struktur in das darunterliegende Quarzglas tief geätzt. Die finale Tiefe $d_{ps} = 378$ nm wurde über den Zusammenhang in Formel (4.6) für eine Phasenschiebung von $\varphi = \pi$ bei $\lambda = 355$ nm ermittelt. Abschließend wurde die Chromschicht wieder vom Glassubstrat entfernt.

(3) Eine telezentrische Beleuchtung der Photomaske

Das letzte optische Element der Beleuchtungsoptik vor der Photomaske ist die Feldlinse. Diese Linse stellt eine telezentrische Beleuchtung der Photomaske sicher. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Design dieser Linse überarbeitet und die konventionelle sphärische Linse gegen eine optimierte asphärische Linse ausgetauscht, sodass die Beleuchtung der Randbereiche der Photomaske zusätzlich verbessert werden kann.

Aber nicht allein die Feldlinse, sondern auch die vorangehende Fourierlinse hat Einfluss auf die homogene Ausleuchtung der Photomaske. Daher bietet die kombinierte Optimierung beider Linsen mehr Freiheitsgrade und somit erweiterte Möglichkeiten der Optimierung. Dementsprechend wurden beide Linsen im Rahmen dieser Arbeit mittels der Optikdesignsoftware Zemax optimiert und anschließend hergestellt sowie in dem Mask Aligner eingebaut. Der Abstand von Fourier- zur Feldlinse bzw. zur Photomaske wurde allerdings entsprechend dem konventionellen Beleuchtungssystem beibehalten, sodass beide Linsen für das konventionelle sowie das Beleuchtungssystem mit dem Laser genutzt werden können.

5.2.1 Experimentelle Ergebnisse

Der Wechsel vom konventionellen Beleuchtungssystem zur Laserbeleuchtung ist durch den Tausch der optischen Schiene mit den Hauptkomponenten einfach realisierbar. Anschließend muss der Laserstrahl in den Galvano-Scanner eingekoppelt werden, sodass er entlang der optischen Achse verläuft.

Für das Testen des Funktionsprinzips des neuen Beleuchtungssystems unter Verwendung des Lasers als Beleuchtungsquelle, wurden verschiedene Experimente zur Herstellung binärer und kontinuierlicher Profile durchgeführt. Dabei wurde u.a. auch der Talbot Effekt eingesetzt, um periodische hoch aufgelöste Strukturen in einem großen Proximity-Abstand zu realisieren. Im Vorfeld der experimentellen Belichtungen wurde mittels Simulationen der Einfluss der Winkelverteilung der Photomaskenbeleuchtung untersucht. In diesem Kapitel werden die Simulations- sowie Experimentergebnisse vorgestellt und analysiert.

Erzeugung binärer Profile individueller Geometrien

Zur Realisierung periodischer, binärer Strukturen unterschiedlicher Geometrien wurde eine periodische Lochraster-Photomaske mit individuellen Winkelspektren belichtet. Die angewandte Methodik erlaubt, das definierte Winkelspektrum als Struktur in den Photoresist zu übertragen. Das Prinzip erinnert dabei an das einer Lochkamera und wurde bereits erfolgreich in der Photolithografie unter Verwendung der Quecksilberdampfampe angewendet [202]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden derartige Experimente allerdings zum ersten Mal mittels Laser als Beleuchtungsquelle und einem Galvo-Scanner zur Definition des Winkelspektrums eingesetzt. Die quadratischen Maskenöffnungen des zweidimensionalen Lochrasters der verwendeten Photomaske haben eine Kantenlänge von 600 nm und sind mit verschiedenen Perioden von $p = 4 \text{ }\mu\text{m}$ und $p = 6 \text{ }\mu\text{m}$ als Testfelder angeordnet. Für die unterschiedlichen Perioden ergeben sich lt. Formel (3.5) mit $\lambda = 355 \text{ nm}$ die verschiedenen Talbot-Abstände von $d_T = 90 \text{ }\mu\text{m}$ bzw. $d_T = 203 \text{ }\mu\text{m}$, welche für die Experimente als Proximity-Abstände verwendet wurden.

Ohne Bewegung der Scannerspiegel wird das kleinstmögliche Winkelspektrum für die Photomaskenbeleuchtung angewendet. Mittels Simulationen lässt sich abschätzen, welche minimale Strukturgröße in Photoresist erreicht werden kann. Abbildung 62 zeigt die simulierte Intensitätsverteilung des Luftbild für die Beleuchtung der zweidimensionalen Rasterlochstruktur der Photomaske mit $6 \text{ }\mu\text{m}$ Periode und einem kreisförmigen Winkelspektrum von $v_{x/y} = \pm 0,04^\circ$ im Abstand $d_T = 203 \text{ }\mu\text{m}$ hinter der Photomaske.

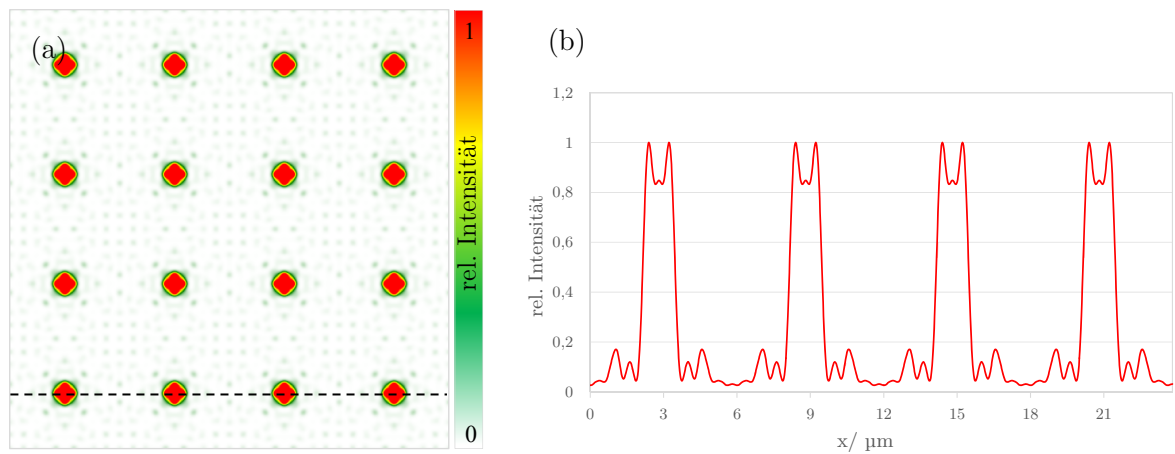


Abbildung 62: (a) Simulationsergebnis der zweidimensionalen Intensitätsverteilung des Luftbildes in $203 \text{ }\mu\text{m}$ Proximityabstand für eine monochromatische Beleuchtung einer binären Lochraster-Photomaske mit $6 \text{ }\mu\text{m}$ Periode. Die schwarze, gestrichelte Linie zeigt die Position der in (b) dargestellten lokalen, eindimensionalen Intensitätsverteilung.

Unter Annahme eines Intensitäts-Schwellwertes in der Simulationen (Abb. 62), z.B. von $I = 0,5$, ergibt sich eine mögliche Prognose der Struktur, wie sie in Photoresist erzeugt werden kann. Daraus leitet sich eine Strukturbreite von ca. $1,25 \text{ }\mu\text{m}$ ab. Wird der Schwellwert zu hoch und somit die später angewandte Bestrahlungsstärke zu niedrig angenommen, besteht die Wahrscheinlichkeit, dass die Strukturen nicht komplett durchentwickelt werden. Durch die Beugungs- und Interferenzeffekte während der Propagation von Photomaske zu Wafer zeigt sich bereits in der Simulation, dass die ursprünglichen quadratischen Maskenöffnungen um 45°

gedreht im Luftbild erscheinen. Im experimentellen Ergebnis zeigt sich diese Tendenz ebenfalls. Abbildung 63 zeigt ein REM-Bild der entwickelten Struktur in Photoresist, welche eine verdrehte quadratische, aber auch leicht verzerrte, fast runde Form als Resultat aufweist. Die experimentell realisierte Strukturgröße von $1,3\text{ }\mu\text{m}$ stimmt gut mit der Dimension im Simulationsergebnis überein.

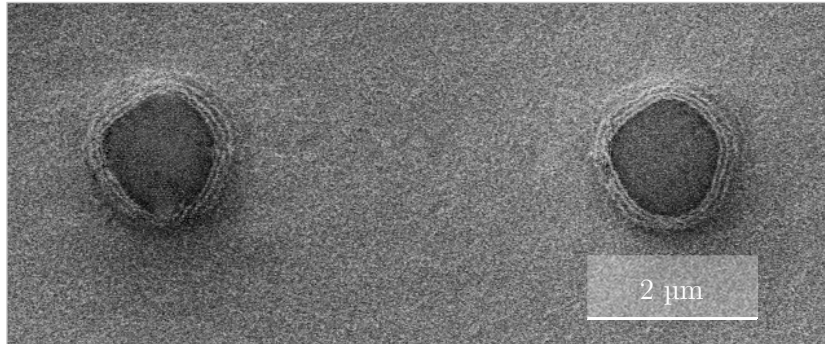


Abbildung 63: Hoch aufgelöste Lochrasterstruktur in Photoresist. Am Rand der Struktur zeigen sich die Effekte stehender Wellen, verursacht durch die Reflexion an der Waferoberfläche (s. Kapitel 4.1.1).

Für die Umsetzung des Experimentes wurde AZ 1505 ca. 500 nm dick auf einen 4 Zoll Silizium-Wafer aufgebracht, mit einer Dosis von 190 mJ/cm^2 ($t_B = 45\text{ s}$) belichtet und anschließend für 30 s in AZ 726MIF entwickelt. Um diese Dosis mit dem entsprechenden Winkelspektrum unter Verwendung des konventionellen Beleuchtungssystems zu erzeugen, wäre eine Belichtungszeit von etwa $t_B = 9\text{ h}$ notwendig, da die benötigte IFP mit nur 1 mm Durchmesser die Bestrahlungsstärke sehr stark verringert ($E_e \approx 0,006\text{ mW/cm}^2$) und den Einsatz somit ineffizient macht.

Basierend auf dem erzielten Ergebnis und der relativ guten Übereinstimmung von Simulation und Experiment wurde in fortführenden Experimenten das Funktionsprinzip des Galvo-Scanners zur Definition des Winkelspektrums der Photomaskenbeleuchtung getestet. Dazu wurde ein vergleichbares Photomaskendesign verwendet, nur mit dem Unterschied das ein Lochraster mit einer nun kleineren Periode von $p = 4\text{ }\mu\text{m}$ in einem damit veränderten Proximity-Abstand entsprechend der Talbotdistanz von $d_T = 90\text{ }\mu\text{m}$ belichtet wurde. Als Teststrukturen wurden zum einen ein Quadrat, ein Dreieck und eine F-Struktur ausgewählt. Für eine Vorhersage der möglichen Strukturform in Photoresist wurden im Vorfeld ebenfalls die Simulationen der Luftbilder im jeweiligen Proximity-Abstand erstellt. Abbildung 64 zeigt einen Überblick dreier verschiedener Luftbilder als Simulationsergebnis in Abhängigkeit des verwendeten Winkelspektrums, dessen Geometrie gleichzeitig die Zielgeometrie der Struktur darstellt, die in Photoresist erzeugt werden soll.

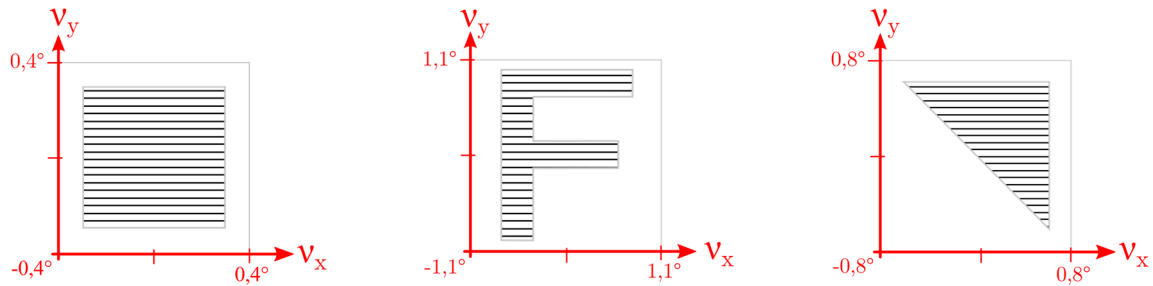
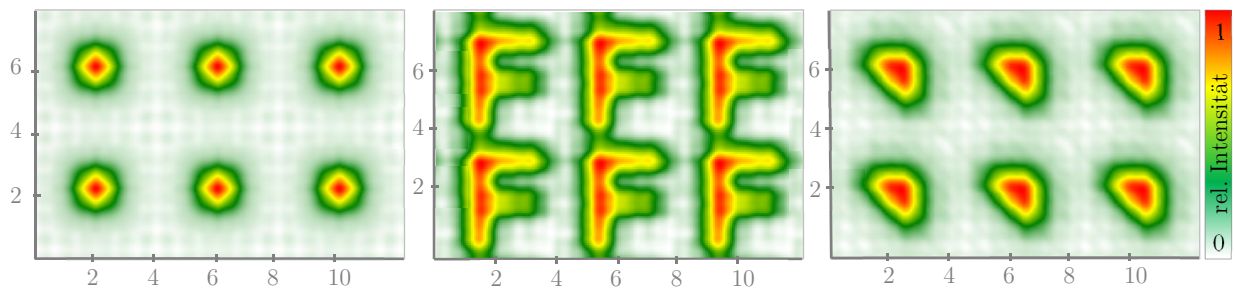
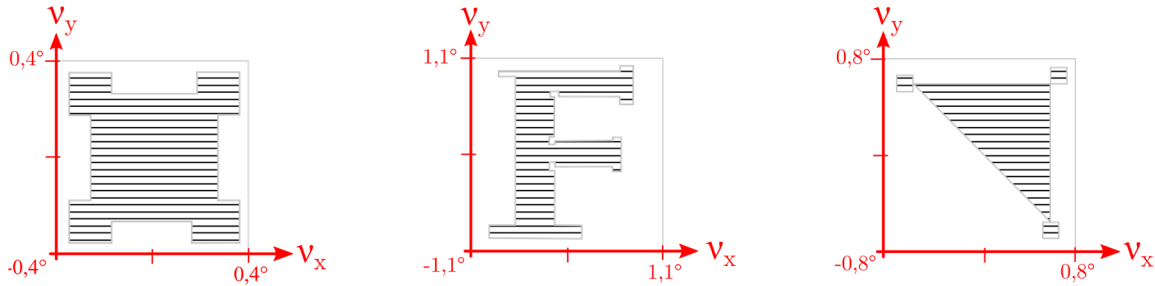
Scanner-definiertes Winkelspektrum $v_{x/y}$ zur Beleuchtung des DiffusorsIntensitätsverteilung des Luftbildes in $d = 90 \mu\text{m}$ 

Abbildung 64: Simulation drei verschiedener Beleuchtungsszenarios mit unterschiedlichen Winkelspektren $v_{x/y}$, die mittels Galvo-Scanner in Verbindung mit einer Lochrastermaske experimentell angewendet werden. Angaben der lateralen Dimensionen des Luftbildes in $[\mu\text{m}]$.

Anhand der Simulationsergebnisse lässt sich bereits der Einfluss von Beugungseffekten auf das finale Strukturergebnis in Photoresist abschätzen. Zu erwarten sind starke Kantenverrundungen, wie sie sich in den Simulationsergebnissen der Luftbilder zeigen. Dabei weisen die Strukturen bereits erhebliche Abweichungen zu den eigentlichen Zielstrukturen auf. Die quadratische Struktur erscheint erneut um 45° rotiert bzw. als runde Form, je nachdem wie hoch der Intensitäts-Schwellwert als Maßgabe für „Dose-to-clear“ angenommen wird. Auch das Dreieck zeigt in den Simulationsergebnissen eine deutliche Verrundung aller Ecken. Die F-Struktur ist die komplexeste Struktur von den drei hier gewählten, da sie u.a. viele innere und äußere Ecken besitzt, sowie zwei eng beieinander liegende Querbalken. Vor allem eine gleichmäßige Intensitätsverteilung dieser horizontalen Linien bereitet Schwierigkeiten, wie in Abb. 64 ersichtlich ist. Als Konsequenz des simulierten Luftbildes ist eine ungleichmäßige bzw. zum Teil unvollständige Strukturübertragung in Photoresist zu erwarten. Kantenverrundungen und Linienverkürzungen würden die Struktur dominieren.

Wird die Zielstruktur also direkt als Geometrie zur Definition des Winkelspektrums angewendet, sorgen Beugungseffekte teilweise für eine qualitativ schlechte Formtreue im simulierten Luftbild. Mittels OPC Strukturen, wie in Kapitel 3.4.4 vorgestellt, können Beugungseffekte gezielt genutzt werden, um die Auflösung zu verbessern. Abbildung 65 zeigt die wiederholten Simulationen der Luftbilder, wobei zusätzliche OPC Elemente den Scan-Figuren hinzugefügt wurden. Die Auswahl der OPC Strukturen, sowie deren Platzierung erfolgte dabei basierend auf den in Kapitel 3.4.4 vorgestellten Regeln für „manuelle OPC“.

Scanner-definiertes Winkelspektrum $v_{x/y}$ zur Beleuchtung des Diffusors



Intensitätsverteilung des Luftbildes in $d = 90 \mu\text{m}$

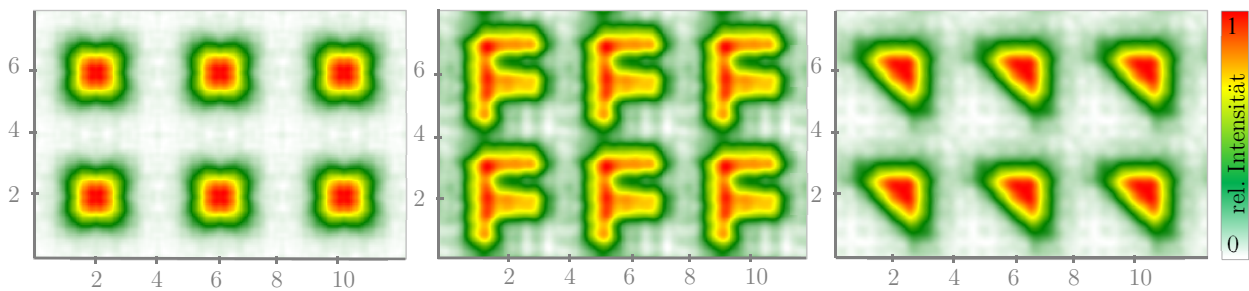
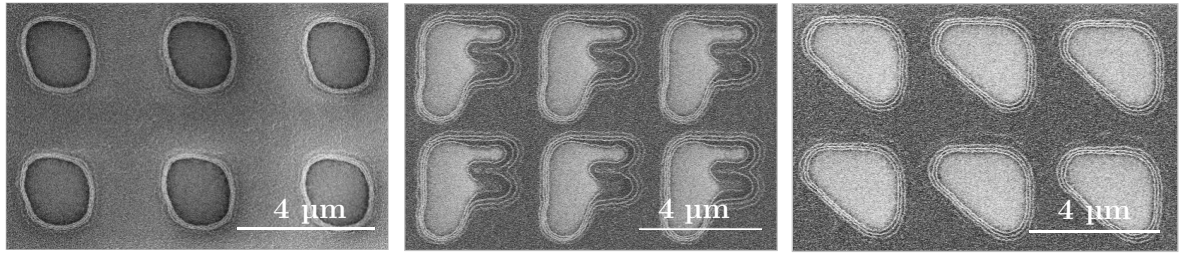


Abbildung 65: Erneute Simulation der Luftbilder im Proximityabstand von $d = 90 \mu\text{m}$ unter Annahme einer Lochrasterphotomaske mit $p = 4 \mu\text{m}$ und dem grafisch dargestellten Winkelspektrum $v_{x/y}$ mit integrierten OPC Elementen, wie z.B. „mousebite oder „serif“. Angaben der lateralen Dimensionen des Luftbildes in $[\mu\text{m}]$.

Die Simulationsergebnisse in Abb. 65 zeigen eine deutliche Verbesserung der erzielten Strukturform mit geringeren Kantenverrundungen und homogenere Intensitätsverteilungen innerhalb der Strukturen. Auch wenn Kantenverrundungen nicht vollständig vermieden werden können, so konnte z.B. der Rotation des Quadrates entgegengewirkt werden, wie das Simulationsergebnis in Abb. 65 zeigt. Eine weitere deutliche Verbesserung zeigt sich in der Intensitätsverteilung der F-Struktur. Unter Annahme eines adäquaten Intensitäts-Schwellwertes, können Linienendverkürzungen bei der Übertragung in Photoresist vermieden werden. Weiterhin verringern sich auch Verrundungen der Dreiecke mit Hilfe von OPC, wodurch eine verbesserte Formgebung erreicht wird.

Entsprechend der Simulationen wurden im Anschluss die experimentellen Belichtungen unter Verwendung der in Abb. 64 und Abb. 65 gezeigten Winkelspektren, ohne und anschließend mit integrierter OPC, durchgeführt. Die Belichtungsergebnisse der Strukturen in Photoresist sind in Abb. 66 dargestellt. Mit einer Belichtungs-dosis von $0,4 \text{ J/cm}^2$ konnte der ca. 500 nm dicke AZ 1505 auf einem 4 Zoll Silizium-Wafer erfolgreich strukturiert werden. Um diese Strukturen unter Verwendung der Quecksilberdampf-lampe mit demselben Winkelspektrum herzustellen, wäre eine 20-fache Belichtungszeit notwendig. Mit dieser verkürzten Belichtungszeit von $t_B = 100 \text{ s}$ zeigt sich ein wesentlicher Gewinn des neuen Belichtungssystems.

Strukturen in Photoresist, erzeugt ohne OPC



Strukturen in Photoresist, erzeugt mit OPC

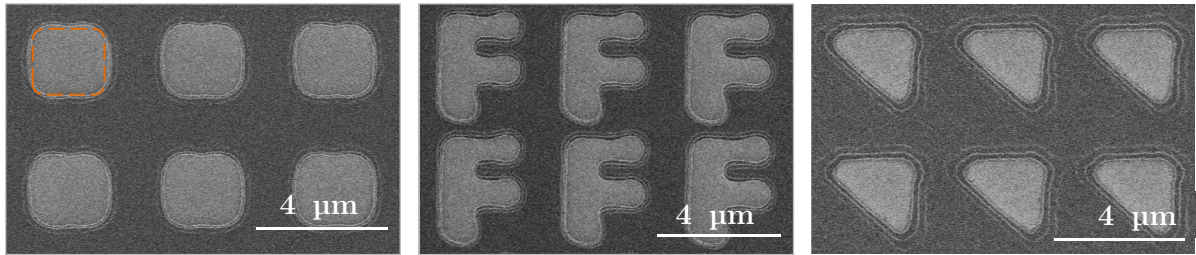


Abbildung 66: REM-Aufnahmen der experimentellen Ergebnisse in AZ 1505 unter Verwendung einer Lochraster-Photomaske ($p = 4 \mu\text{m}$) und der in Abb. 64 und Abb. 65 gezeigten Winkelspektren definiert mittels Galvo-Scanner.

Die Belichtungsergebnisse in Abb. 66 zeigen deutlich den positiven Einfluss der integrierten OPC Elemente. Entsprechend der Simulationsergebnisse konnte die Strukturform sowie -auflösung in Photoresist verbessert werden. Anhand der Simulationen war bereits im Vorfeld eine gute Prognose der Strukturform gegeben.

Die Belichtungen mit OPC ermöglichten in der Strukturübertragung z.B. die vollständige Auflösung der waagerechten Linien bei der F-Struktur. Auch die quadratische Form konnte deutlich besser angenähert werden, auch wenn die Verrundung der Ecken nicht vollständig verhindert werden konnte. Anhand der Dreiecksstruktur zeigt eine vergrößerte Gegenüberstellung in Abb. 67 die markanten Unterschiede der Ergebnisse einmal mit und einmal ohne die Verwendung von OPC. Durch den gezielten Einsatz der Hilfsstrukturen, die selbst nicht aufgelöst werden, konnten Beugungseffekte kompensiert und somit die Verrundung der Ecken verringert und folglich eine verbesserte Form der Zielstruktur erreicht werden.

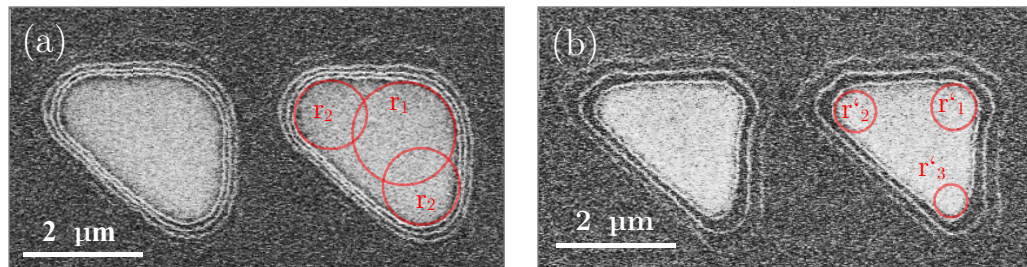


Abbildung 67: REM-Bilder zum Vergleich der experimentell realisierten Photoresiststrukturen in AZ 1505, die (a) ohne und (b) mit OPC Strukturen in der Scan-Figur, erzeugt wurden. Die roten Kreise veranschaulichen die unterschiedlichen Eckenradien der erzeugten Struktur als Maßstab für die Verringerung der Eckenverrundung und der somit verbesserten Strukturform. (a) Ohne OPC ergeben sich Eckenradien von $r_1 \approx 970 \text{ nm}$ und $r_2 \approx 595 \text{ nm}$. (b) Die Verwendung von OPC verbessert die Eckenradien der Dreiecks-Struktur auf $r'_1 \approx 370 \text{ nm}$, $r'_2 \approx 330 \text{ nm}$ sowie $r'_3 \approx 280 \text{ nm}$.

Da bei dieser Methodik die OPC Elemente, statt wie üblicherweise auf der Photomaske oder der IFP, hier im Winkelspektrum implementiert und somit vom Galvo-Scanner realisiert werden, kann eine sehr flexible Anpassung der Form und Position dieser Hilfsstrukturen erfolgen. Im Gegensatz dazu müsste unter Verwendung des Beleuchtungssystems mit Quecksilberdampfampe für jede Änderung des Winkelspektrums eine neue Metallapertur gefertigt werden. Dieser Aufwand bleibt unter Verwendung des Laser-Beleuchtungssystems aus. So können im Experiment sehr schnell beliebige Winkelspektren flexibel verändert und angewendet werden. Die erfolgreich realisierten Photoresiststrukturen wurden in einem Folgeprozess in den darunter befindenden Silizium-Wafer tief geätzt. Die Zieltiefe betrug $1\text{ }\mu\text{m}$. Die Ergebnisse sind in Abb. 68 dargestellt.

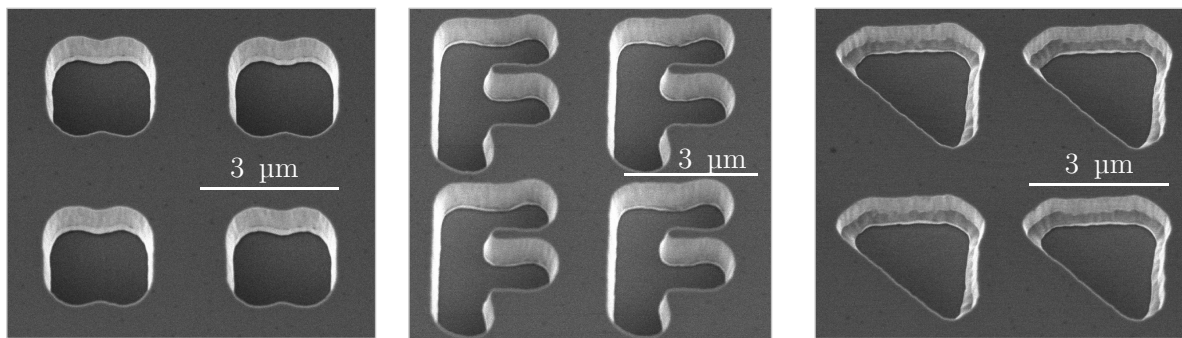


Abbildung 68: REM-Aufnahmen der tiefgeätzten Strukturen in Silizium, basierend auf der Anwendung des in Abb. 65 gezeigten Winkelspektrums.

Mittels Plasmaätzen wurden die Strukturen nahezu identisch von Photoresist in Silizium übertragen. Dabei konnten vor allem für das Quadrat und die F-Struktur sehr steile Strukturflanken realisiert werden. Die zwei unterschiedlichen Grautöne innerhalb der Flanken in den einzelnen Dreiecken in Abb. 68 deuten auf einen kleinen Absatz hin. Je nach Anwendungsgebiet und ggf. weiteren Bearbeitungsschritten kann dies störend sein. Die Ursache für diesen kleinen Absatz in der Siliziumstruktur lässt sich auf die bestehende bereits relativ flache Resistkante zurückführen, wie die REM-Aufnahme in Abb. 67 (b) vermuten lässt. Die Übertragung der Resiststruktur in Silizium wurde an dieser Stelle nicht optimiert.

Flache Photoresistkanten können aber im Vorfeld mittels eines zusätzlichen Vorätzens so optimiert werden, dass man zunächst senkrechte Kanten in Resist erzeugt. Erst in einem zweiten Ätzvorgang wird dann die Struktur mit verbesserter Resistmaske in das darunterliegende Substrat übertragen. So können trotz ggf. flacher Resistflanken steile Strukturflanken im Substrat erzielt werden.

Erzeugung von kontinuierlichen Strukturprofilen

Neben der Herstellung beliebiger binärer Strukturen, sind auch kontinuierliche Strukturen von hohem Interesse, wie bereits im Kapitel 4.1 erläutert. In einem ersten Experiment soll mittels einer eindimensionalen Gittermaske und einem angepassten Winkelspektrum auf einfache Weise eine kontinuierliche Blazestruktur mittels Laserbeleuchtung hergestellt werden. Die Verwendung des Galvo-Scanners erlaubt eine unkomplizierte Definition eines individuellen Winkelspektrums. Zur Erzeugung eines eindimensionalen Blazegitters wird eine Gittermaske mit einem optimierten Winkelspektrum, wie in Abb. 69 (a) abgebildet, belichtet. Eine Integration über die y-Richtung (parallel der Gitterlinien) der sich ergebenden Intensitätsverteilung im Luftbild ergibt eine sägezahnartige Belichtungs-dosis, welche dann in Photoresist übertragen wird. Anders formuliert bedeutet dies, dass das angewendete Winkelspektrum innerhalb einer Gitterperiode repliziert werden kann. Für bestimmte Anwendungen wird allerdings statt einer linearen eine modifizierte Blazeflanke benötigt. Aus diesem Grund wurde an dieser Stelle keine dreieckförmige Winkelverteilung verwendet, sondern die in Abb. 69 (a) dargestellte Form. Die Größe des Winkelspektrums wird an die Periode von $p = 2\text{ }\mu\text{m}$ des linearen Gitters angepasst. Für die Replikation dieser Periode wurde die dazugehörige Talbot-Distanz unter Berücksichtigung der Beleuchtungswellenlänge von $\lambda = 355\text{ nm}$ als Maske-Substrat-Abstand mit $d = 22,5\text{ }\mu\text{m}$ verwendet. Das Öffnungsverhältnis Maskenöffnung : Periode der binären Chrommaske beträgt 1:4. Abbildung 69 (b) zeigt das mit dieser Methode realisierte Strukturergebnis in Photoresist.

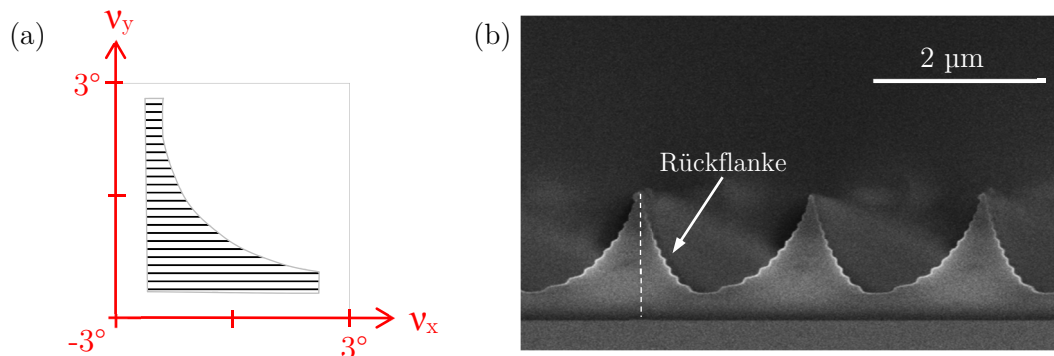


Abbildung 69: Unter Verwendung einer binären eindimensionalen Gittermaske und dem in (a) dargestellten, maßgeschneiderten Winkelspektrum $v_{x/y}$, welches vom Galvano-Scanner definiert wird, konnte ein Sägezahn-förmiges Profil in AZ 4562 hergestellt werden. (b) zeigt eine REM-Aufnahme einer Bruchkantenanalyse dieser Struktur. Die wellenartige Oberflächenstruktur, verursacht durch stehende Wellen (s. Kapitel 4.1.1), kann mit einer Antireflex-Schicht zwischen Photoresist und Wafer reduziert werden.

Die Photoresiststruktur in Abb. 69 (b) wurde mit einer Belichtungs-dosis von 98 mJ/cm^2 und einer zusätzlichen Flutbelichtung mit einer Dosis von 21 mJ/cm^2 erzeugt. Typischerweise bildet sich, wie bereits in Kapitel 4.1.1 beschrieben, eine sogenannte Inhibierungsschicht an der Oberfläche des Resistes heraus. Mit einer Flutbelichtung kann man dieser unerwünschten Erscheinung entgegenwirken, wobei allerdings der Kontrast der Struktur verringert wird. Dies ist eine Ursache, warum das Ergebnis in Abb. 69 (b) nur eine schwache Blaze-Asymmetrie aufweist. Ein weiterer Einfluss ist der Gradation des Resistes geschuldet. Typischerweise ist die Rückflanke steiler als die Blazeflanke. Hauptsächlich bestimmt die Anwendung über die

Anforderungen an den Blaze- und Rückflankenwinkel sowie die Profiltiefe, wie in Kapitel 4.1 erörtert. Dort wurden auch bereits verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, um kontinuierliche Profile, insbesondere Blazegitter, herzustellen. Eine Möglichkeit war die Nutzung einer Phasemaske, die speziell für die Erzeugung einer senkrechten Rückflanke entwickelt wurde. Diese Maske soll nun auch verwendet werden, um die Erzeugung eines kontinuierlichen Blazeprofiles mittels Laserbeleuchtung im Mask Aligner zu demonstrieren.

Da der Unterschied der Laserwellenlänge zu der i-Linien Designwellenlänge der Phasemaske sehr gering ist, kann die Phasemaske auch unter Verwendung des Lasers genutzt werden, ohne dass das Funktionsprinzip stark beeinflusst wird. Neben der flexiblen Konfiguration der Beleuchtungswinkel im neuen Belichtungssystem besteht ein bedeutender Vorteil in der optimierten Belichtungszeit durch eine verbesserte Bestrahlungsstärke. So konnte die Struktur im Vergleich zur Verwendung des konventionellen Beleuchtungssystem mit Quecksilberdampfampe 14 mal schneller realisiert werden. Abbildung 70 zeigt das Ergebnis in Photoresist als REM-Aufnahme der Blazestruktur.

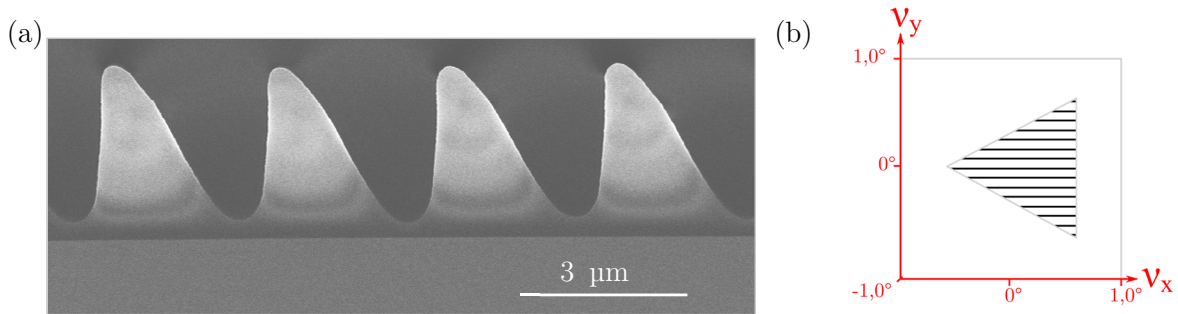


Abbildung 70: (a) REM-Aufnahme einer Blazestruktur in AZ ECI3027 unter Verwendung der Phasemaske aus Kapitel 4.1.2, (b) belichtet mit Laser und einem Winkelspektrum von $v_{x/y} = \pm 0.8^\circ$ in einem Proximity-Abstand von $d = 49 \mu\text{m}$.

Das in Abb. 70 dargestellte Blazegitter wurde mit einer Belichtungs-dosis von 124 mJ/cm^2 und in einem Proximity-Abstand von $d = 49 \mu\text{m}$ in $3 \mu\text{m}$ dickem AZ ECI3027 erzeugt. Die Photomaske wurde dabei mit einem dreieckförmigen Winkelspektrum mit maximalen Beleuchtungswinkeln von $v_{x/y} = \pm 0.8^\circ$ (Abb. 70 (b)) belichtet. Dabei wirkt die dreieckförmige Winkelverteilung unterstützend zur Formgebung, da die Integration über die y-Richtung eine sägezahnartige Belichtungs-dosis ergibt, analog zum vorausgegangenen Experiment. Auf Basis der optimierten Photomaske soll allerdings nun neben der senkrechten Rückflanke auch im besten Fall eine lineare Blazeflanke generiert werden, wozu das Winkelspektrum erneut angepasst wurde. Unter Anwendung der optimierten Phasemaske, sowie eines hochauflösenden Resistes und mit den beschriebenen Belichtungsparametern konnte das in Abb. 70 (a) gezeigte $2,75 \mu\text{m}$ tiefe Blazegitter mit annähernd senkrechten Rückflanken in Photoresist hergestellt werden.

Für fortführende Herstellungsschritte, wie das Tiefätzen in Quarzglas, müssen abhängig von der Anwendung die genauen Parameter für das Gitter spezifiziert werden. In Kapitel 4.1 konnte bereits der Einfluss des Rückflanken- sowie Blazewinkels auf die Beugungseffizienzen in

Transmission aufgezeigt werden. Dabei wurde der Einfluss spezifischer Strukturcharakteristiken ebenfalls diskutiert. Diese haben auch hier zu einem großen Teil Gültigkeit.

An dieser Stelle wird eine weitere Prozessierung der Photoresiststruktur allerdings nicht verfolgt, da im Vordergrund dieser Arbeit die primäre Strukturzeugung steht. Zur Demonstration wurde bereits im Kapitel 4.1 ein erfolgreicher Übertrag in Quarzglas gezeigt. Neben dem direkten Übertragen der Struktur in das sich unter dem Photoresist befindende Wafermaterial kann die Struktur auch abgeformt und mittels Replikationsverfahren vervielfältigt werden [78, 299].

5.2.2 Weiterführende Optimierungs- und Einsatzmöglichkeiten

Nachdem nun die Funktion des neuen Beleuchtungssystems basierend auf einem Laser als Belichtungsquelle für die Mask Aligner Lithografie erfolgreich gezeigt wurde, können verschiedene Dinge weiterführend integriert sowie verknüpft werden. Der momentane Aufbau kann in Bezug auf das Zusammenspiel einzelner Komponenten noch optimiert werden. In einem weiteren Schritt werden nun Mask Aligner, Laser, sowie Scanner so miteinander verknüpft, dass die Belichtung letztendlich nur noch mittels Mask Aligner gesteuert werden muss. Eine separate Einstellung bzw. Definition des Winkelspektrums muss vorerst jedoch weiterhin im Vorfeld an die Belichtungen separat am Computer mit der integrierten Scannersoftware erfolgen. Eine Implementierung dieser Einstellung ist nicht ohne weiteres in die Software des Mask Aligners möglich.

Für die Umsetzung beliebiger Winkelspektren wäre die Anschaffung eines akustooptischen Modulators (AOM) von großem Vorteil. Ein AOM kann den einfallenden Laserstrahl in Frequenz, Ausbreitungsrichtung und Intensität beeinflussen. Mit dem momentanen Aufbau und der aktuellen Software können Parameter wie z.B. die Modulation der Laserstrahlintensität oder bestimmte Konfigurationen zur Strahlablenkung noch nicht adressiert werden. Mittels AOM könnten einflussreiche Kenngrößen für die lithografischen Belichtungen, wie z.B. die Generierung bestimmter Scanner-Figuren bzw. Beleuchtungswinkelverteilungen, weiter in der Anwendung vereinfacht und somit Fehlern vorgebeugt werden. Das Beispiel einer ringförmigen Beleuchtung in Abb. 71 stellt die Problematik veranschaulicht dar.

Abbildung 71 zeigt zwei verschiedene Scanvarianten für ein ringförmiges Winkelspektrum. In Abb. 71 (a) würde der Laserstrahl sequentiell und mäanderförmig das Linienmuster von oben nach unten abrastern und anschließend wieder von oben, wenn nötig für ein weiteres Mal, beginnen. Bei dieser Variante besteht die Schwierigkeit, dass der Laserstrahl für die innere Kreisfläche abgeblendet werden müsste, um von der einen Ringseite auf die andere Seite zu gelangen. Dies wurde in Abb. 71 (a) durch die gestrichelten Linien angedeutet. Da es sich bei dem genutzten Galvano-Scanner inkl. Software um ein typisches Element für Systeme der Laserbeschriftung handelt, muss bei den Einstellungen für die Lithografie etwas umgedacht werden. Für Laserbeschriftungen könnte der Laser im Bereich der gestrichelten Linien z.B. schneller verfahren, sodass in diesem Bereich keine Materialbeeinträchtigung mittels Laser erfolgen kann. Für die Definition des Winkelspektrums funktioniert diese Variante nicht. Egal

wie schnell sich der Laserstrahl bewegt, er definiert an jedem Ort, an dem der Diffusor im Anschluss beleuchtet wird, Beleuchtungswinkel auf der Photomaske.

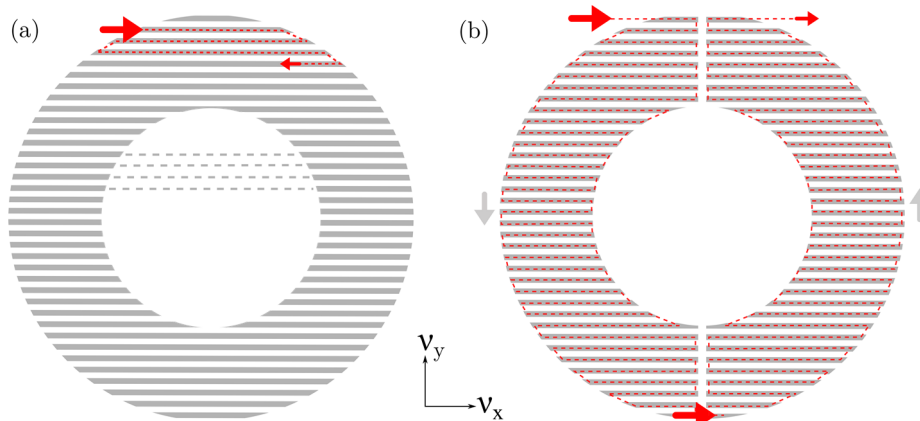


Abbildung 71: Definition des Winkelspektrums mittels Galvanoscanners: zwei unterschiedliche Scanvarianten des Laserstrahls zur Beleuchtung des Diffusors. (a) Dieses Scanmuster ergäbe letztendlich eine kreisförmige Beleuchtung. (b) Dieses Scanmuster zeigt eine mögliche Modifikation für eine getreue Realisierung der gewünschten ringförmigen Beleuchtungswinkel.

Um eine Ringbeleuchtung mit dem aktuellen Aufbau zu generieren, muss ein Muster erzeugt werden, welches ohne „Sprünge“ zu realisieren ist. Eine Variante ist in Abb. 71 (b) dargestellt. Dafür wurde der Ring in zwei Teile geteilt. Zunächst wird z.B. das Linienmuster auf der linken Seite von oben nach unten erzeugt, und im Anschluss das Muster der rechten Seite von unten nach oben. Bei Bedarf kann anschließend auch wieder auf der linken Seite von oben begonnen werden, ohne dass „Sprünge“ erforderlich sind. Bei der Erstellung der Scanmuster in der Software müssen solche Aspekte bedacht werden, sonst könnten Beleuchtungswinkel erzeugt werden, die weder gewünscht sind, noch in der Zeichnung definiert wurden, aber aufgrund von Sprüngen auftreten. In der aktuellen Software gibt es viele Einstellungen, die nicht für den Zweck lithografischer Belichtungen vorgesehen sind, aber dennoch optimiert werden müssen, um zufriedenstellende Ergebnisse hoher Auflösungen zu generieren.

Unter der Verwendung eines AOM könnte diese Problematik von ungewünschten Beleuchtungswinkeln überwunden werden. Ein AOM könnte den Laserstrahl hochpräzise in den Bereichen ausblenden, in denen kein Licht bzw. kein Beleuchtungswinkel definiert werden soll.

Eine weitere Option, die ein AOM ermöglichen würde, wäre die Regulierung der Strahlintensität. Dies wäre für die Erzeugung kontinuierlicher Oberflächenprofile von Interesse. Nutzt man z.B. ein linienförmiges Winkelspektrum mit einer eindimensionalen binären Gittermaske, wie aus Kapitel 4.1.1, in Kombination mit dem verfahrenbaren Maskenhalter, können auf einfache und flexible Art kontinuierliche Profile verschiedenster Form hergestellt werden. Das aktuelle System könnte so auf eine relativ einfache Weise an neuen Freiheitsgraden für eine erweiterte Flexibilität und somit neuen Belichtungsstrategien gewinnen.

Eine weitere Belichtungsmethode zur Generierung flexibler und individueller Winkelspektren zur Photomaskenbeleuchtung könnten LED-Arrays darstellen, bei denen die LEDs einzelnen gesteuert werden können. Vergleichbar zum Adaptiven Scheinwerfer der Automobilindustrie [11] könnte mittels einzeln ansteuerbarer Pixel maßgeschneiderte Photomaskenbeleuchtungen realisiert werden.

6 Technologieauswahl Mask Aligner Lithografie

Die vorausgegangenen Kapitel haben gezeigt, dass es eine Vielzahl neuartiger Methoden zur Primärstrukturierung mittels Mask Aligner gibt. Dieses Kapitel gibt einen abschließenden Überblick über verfügbare Photomaskentechnologien sowie mögliche Beleuchtungsoptionen für die Mask Aligner Lithografie. Dafür wurden systematische Zuordnungen potentieller Kombinationen aus Photomaskentechnologie und Maskenbeleuchtungen erstellt, die für definierte Eigenschaften einer Zielstruktur optimierte lithografische Ergebnisse erzielen können. Die aufgezeigten Kombinationen sind abgeleitete Empfehlungen als Resultat der vorliegenden Arbeit.

Mit Hilfe von Abb. 72 können mögliche Kombinationen von Photomaske und Beleuchtung für anwendungsbezogene Strukturparameter ermittelt werden. Die in der Praxis vorkommenden Strukturen können nach drei wesentlichen Kriterien unterschieden werden, die für die Herstellung signifikant sind. Mögliche Oberflächenprofile (OF) können in binäre oder kontinuierliche Strukturierungen unterteilt werden, die sich entweder periodisch oder aperiodisch wiederholen und sich anhand ihrer charakteristischen Strukturgröße unterscheiden lassen.

Typische Repräsentanten für periodischen Strukturen stellen binäre oder auch geblazte Gitter dar, ohne die Allgemeinheit zu beschränken. Binäre nichtperiodische Strukturen werden oft für ME(O)MS benötigt. Zu nichtperiodischen Strukturen mit kontinuierlichen Oberflächenprofil zählen z.B. Fresnellinsen oder refraktive Strahlformer.

Für die meisten Anwendungsfälle können theoretisch verschiedene technologische Kombinationen zur Realisierung angewendet werden. Anhand konkreter Merkmale, wie z.B. die notwendige Schärfentiefe, müssen die einzelnen Optionen geprüft werden. Während z.B. für die Herstellung binärer Strukturen mit großen Perioden p gegenüber der Beleuchtungswellenlänge λ typischerweise binäre (Amplituden-)Photomasken mit kollimierter Beleuchtung verwendet werden, kommen für binäre Strukturierungen mit Perioden in Größenordnung der Beleuchtungswellenlänge auch Phasenmasken zum Einsatz. Der zusätzliche Einsatz spezieller Winkelspektren der Photomaskenbeleuchtung ermöglicht fortführende Optimierungen wie die Erzeugung individueller Intensitätsverteilungen in der Substratebene, sowohl ein- als auch zweidimensional.

Die Grundvoraussetzung für fortschrittliche Photomaskentechnologien, auch über den aktuellen Stand der Technik hinaus, ist eine homogene Beleuchtung der Photomaske, ansonsten schränken sich die nutzbaren Photomaskenvarianten bedeutend ein. Gleichzeitig können somit auch individuelle Winkelspektren der Photomaskenbeleuchtung eingestellt werden.

Aufgrund des bisher ausschließlich experimentellen Charakters, gibt es noch keine vollständige Systematik für die doppelseitige-strukturierte Photomaske. Bisher kann diese als zusätzliche Option für Spezialfälle, z.B. mit hohen Anforderungen an die Schärfentiefe oder für 3D Belichtungen, eingesetzt werden.

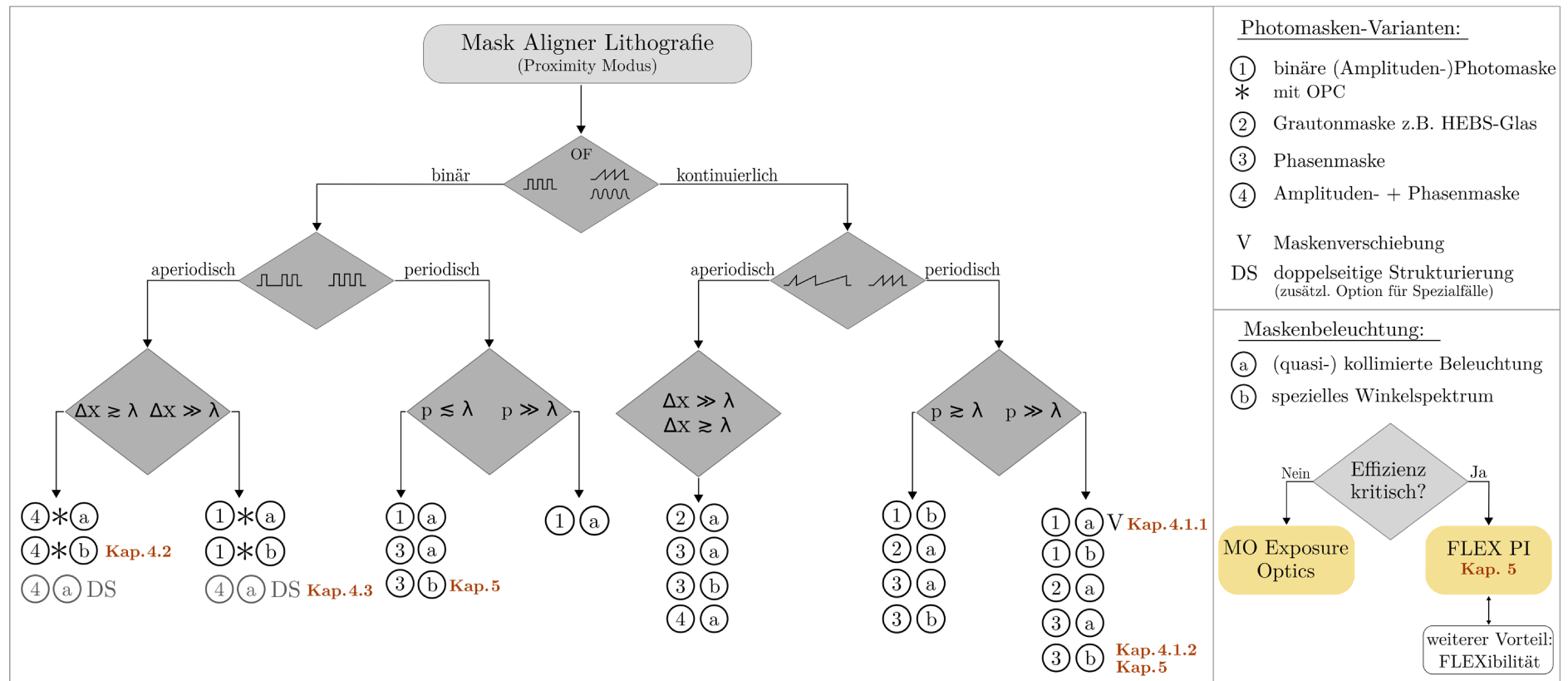


Abbildung 72: Technologieauswahl für die Mask Aligner Lithografie entsprechend der Zielgeometrie. Mittels Mask Aligner herstellbare Strukturen können nach drei wesentlichen Merkmalen gruppiert werden: Oberflächenprofil (OF), der Periodizität und der Auflösung im Bezug zur Beleuchtungswellenlänge λ . Für periodische Strukturen wird die Periode p und für aperiodische Strukturen die kleinste Strukturbreite Δx als Kenngröße verwendet. Eine homogene Beleuchtung der Photomaske wird vorausgesetzt. Die Restdivergenz der (quasi-) kollimierten Photomaskenbeleuchtung beträgt $v_{x/y} = \pm 0,2^\circ$ (MO Exposure) bzw. $v_{x/y} = \pm 0,04^\circ$ (FLEX PI). Verschiedene Kombinationen wurden in Rahmen dieser Arbeit in den einzelnen Kapiteln (Kap.) verwendet und diskutiert.

7 Zusammenfassung

Die Mask Aligner Lithografie bietet einfache und adaptierbare Herstellungsmöglichkeiten zur Erzeugung einer Primärstruktur für ein breites Spektrum an Elementen, auch speziell für die Mikrooptik. Für den lithografischen Prozess stellen die Photomaske sowie deren Beleuchtung signifikante und einflussreiche Parameter für die Strukturerzeugung dar. Diese Bedeutung konnte im Rahmen dieser Arbeit anhand verschiedener Beispiele unterstrichen und genutzt werden. Bereits in vorausgegangenen Arbeiten konnte das Potenzial optimierter Photomasken für die Beugungslithografie zur Generierung periodisch hoch aufgelöster binärer Strukturen gezeigt werden [9, 10]. In der vorliegenden Arbeit wurde neben der Entwicklung neuartiger Photomasken-Technologien ein neues Beleuchtungssystem eingeführt, bei dem die konventionell genutzte Beleuchtungsquelle einer Quecksilberdampflampe gegen einen Festkörperlaser getauscht wurde. So wurde die Erzeugung mikrooptischer Strukturen optimiert und neue Belichtungskonzepte z.B. zur Herstellung kontinuierliche Oberflächenprofile oder aperiodischer Strukturen erarbeitet. Eine neu entwickelte Technologie für verschiebbare Photomasken ermöglicht Mehrfachbelichtungen, um beispielsweise kontinuierliche Oberflächenprofile herzustellen oder die Dichte binärer Strukturen zu erhöhen. Eine weitere Möglichkeit, kontinuierliche Strukturen herzustellen, bieten optimierte Photomasken. So konnte gezeigt werden, dass mittels mehrstufiger Phasenmaske die Geometrie einer Blazestruktur angepasst und eine senkrechte Rückflanke generiert werden kann. Weiterhin wurden neue Photomaskendesigns basierend auf einer kombinierten Amplituden- und Phasenmodulation entwickelt. So konnte eine erfolgreiche Auflösungssteigerung der Schattenwurf lithografie für aperiodische Strukturen mittels einer mehrstufigen Photomaske realisiert werden. Darüber hinaus wurde ein neuartiges Konzept einer doppelseitig strukturierten Photomaske entwickelt und am Beispiel der Strukturierung dicker Lacke getestet.

Die entwickelte Technologie einer verfahrenbaren Photomaske zur Erzeugung kontinuierlicher Oberflächen wurde exemplarisch anhand eines Sägezahnprofils in Photoresist demonstriert. Dafür fand eine kombinierte Belichtung mit lateraler Verschiebung einer binären Photomaske und lokal variierender Belichtungs dosis statt. Auf diese Weise konnte eine Blazestruktur mit 2 μm Periode mittels sechs Teilbelichtungsschritten erzeugt werden. Der Vorteil dieser Applikation besteht in der Verwendung einer preiswerten binären Photomaske, die neben der Erzeugung von binären Mehrfachbelichtungen (z.B. Double-Patterning) auch Grautonlithografie ermöglicht. Eine fortführende Optimierung dieser Technologie lässt sich mit Hilfe einer Simulation der Doseinbringung in Photoresist, insbesondere für Mehrfachbelichtungen für kontinuierliche Oberflächenprofile, erzielen. So kann die Wahl der Schrittweite sowie die Höhe der Belichtungs dosis im Vorfeld an das Experiment optimiert werden.

Bestimmte Gitterkonfigurationen benötigen spezielle Strukturgeometrien, wie z. B. die einer senkrechten Rücksprungflanke einer Blazestruktur, um optimierte Effizienzen zu erzielen. Hierfür ist die Methode der Mehrfachbelichtung weniger gut geeignet. Aus diesen Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit die Belichtung einer rigoros-optimierten mehrstufigen Phasenmaske

demonstriert, mit der die Herstellung eines Blazegitters mit 3 μm Periode und maximaler Profiltiefe von 3,5 μm erst in Photoresist erfolgreich realisiert und anschließend in Quarzglas übertragen wurde.

Während periodische Photo-/Phasenmasken typischerweise rigoros optimiert werden können, wurde für die Optimierung von nicht-periodischen und isolierten Strukturen ein angepasster iterativer Projektionsalgorithmus entwickelt, der für eine optimierte Intensitätsverteilung in der Waferebene die notwendige Amplituden- und Phasenmodulation des transmittierenden Lichtes der Photomaske berechnet. Eine beträchtliche Bedeutung hat dabei das Startdesign des Photomaskenelementes, mit dem das Ergebnis der iterativen Optimierung signifikant beeinflusst wird. An einem einfachen Beispiel von fünf Linien konnte der Einfluss einer zusätzlichen alternierenden Phasenschiebung bei einem binären Maskenlayout demonstriert und eine Auflösung von 2 μm bei einem Proximity-Abstand von 30 μm erreicht werden. Destruktive Interferenz von benachbarten Photomaskenöffnungen ermöglicht die Verringerung von Beugungseffekten und somit eine lokale Erhöhung der Auflösung. Für komplizierte Photomaskenstrukturen, bei den die Phasenschiebung allein nicht ausreicht, um die Struktur unter Verwendung eines Proximity-Abstandes in Photoresist aufzulösen, wurde eine alternierende Phasenschiebung dem Startdesign zugrunde gelegt und der entwickelte Algorithmus genutzt, um das passende Photomaskenlayout zu erzeugen und damit die angestrebte Struktur herzustellen. Das Konzept der iterativen Optimierung diffraktiver Photomaskenelemente mit kombinierter Phasenschiebung kann im Allgemeinen auf beliebige Strukturgeometrien übertragen werden. In der vorliegenden Arbeit, wurden Strukturbeispiele gezeigt, bei denen die Auflösungslimitation konventioneller Proximity-Lithografie, die mit größer werdendem Maske-Substrat-Abstand immer geringer wird, mit einer kombinierten Amplituden- und Phasenmaske überwunden werden konnte.

Mit der Anzahl der Phasenlevel in einer solchen Maske nimmt theoretisch die Qualität der Strukturerzeugung zu. Herstellungstechnisch werden die Phasenlevel durch verschieden tief geätzte Stufen in der Photomaske umgesetzt. Das bedeutet, dass der Aufwand der Photomaskenherstellung mit der Anzahl der Phasenlevel steigt. Die Limitationen an die Realisierung des finalen Photomaskendesigns werden durch die Schlüsseltechnologie der Elektronenstrahlolithografie vorgegeben und sollten prinzipiell bereits in der Designphase berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde so z.B. die minimale Strukturgröße der kombinierten Amplituden- und Phasenmaske auf 200 nm und die Anzahl der Phasenwerte auf zwei beschränkt. Eine zweistufige Phasenmaske mit zusätzlicher Amplitudenmodulation mittels Chromschicht wurde hergestellt und erfolgreich getestet.

Die zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade, wie z. B. die Anzahl an Phasenlevel, haben entscheidenden Einfluss auf den Erfolg der Optimierung der Intensitätsverteilung in der Waferebene. Eine weitere Möglichkeit bietet das Nutzen der Rückseite der Photomaske, wodurch zusätzliche Freiheitsgrade geschaffen werden können, die die Propagation von Licht manipulieren. So wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges Konzept einer doppelseitig strukturierten Photomaske erstmals entwickelt und getestet. Die herausfordernde Ausrichtung von Rück- und Vorderseite konnte erfolgreich durch eine eigens entwickelte Technologie,

basierend auf diffraktiven Elementen, realisiert werden. Das Funktionsprinzip der Photomaske selbst wurde anhand der Strukturierung von dickem Lack, wie es z. B. für Durchkontaktierungen (TSVs) notwendig ist, ebenfalls erfolgreich demonstriert. Als Beispiel wurde ein Array von 3×3 Kreisflächen mit $20\ \mu\text{m}$ Durchmesser sowie einem lokalem Abstand von $40\ \mu\text{m}$ bzw. $50\ \mu\text{m}$ und $30\ \mu\text{m}$ Strukturtiefe in Photoresist hergestellt. Im Vergleich zu einer Belichtung mittels konventioneller binärer Photomaske besteht der Vorteil der Verwendung der doppelseitig-strukturierten Photomaske in einer Reduzierung der Belichtungszeit um Faktor zwei, sowie in verbesserten Strukturflanken.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Photomaskentechnologien zeigen verschiedene Möglichkeiten, die zahlreichen Freiheitsgrade der Photomaske zur Optimierung der Belichtungsergebnisse zu nutzen. Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung dieser entwickelten Technologien ist die Verwendung einer hochkollimierten Photomaskenbeleuchtung mit der implementierten Option eines maßgeschneiderten Winkelspektrums der Photomaskenbeleuchtung, wie am verwendeten Mask Aligner gegeben. Denn die Anwendung der entwickelten Photomaskentechnologien beinhaltet stets eine individuelle angepasste Beleuchtung der Photomaske hinsichtlich Beleuchtungswinkel, um optimale Strukturergebnisse sicherzustellen.

Nichtsdestotrotz bestehen beim Gebrauch der Quecksilberdampflampe des verwendeten Beleuchtungssystems Limitationen, insbesondere zur Erzeugung von Strukturen hoher Auflösung. Für die Optimierung der Auflösung muss das Winkelspektrum der Photomaskenbeleuchtung minimiert werden. Bei dem konventionellen Beleuchtungssystem mit Quecksilberdampflampe als Quelle werden die Beleuchtungswinkel der Photomaske über eine Metallblende (IFP) im Strahlengang definiert. Für sehr kleine Winkelspektren können sich theoretisch Aperturöffnungen mit einem Durchmesser kleiner $5\ \text{mm}$ ergeben, wodurch sich ineffiziente Belichtungszeiten ergeben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein neues Beleuchtungssystem entwickelt, bei dem auf die Verwendung der limitierenden IFPs verzichtet werden kann. Die Integration eines Lasers als Beleuchtungsquelle erlaubt darüber hinaus eine dynamische Kontrolle sowie einfache Änderung des Winkelspektrums der Photomaskenbeleuchtung mittels eines Galvano-Scanners. Durch das neue Beleuchtungssystem ist eine neu definierte Flexibilität hinsichtlich der Photomaskenbeleuchtung im Mask Aligner erreicht worden, mit der zukünftig neue Ansätze für die gemeinsame Optimierung von Quelle und Maske ermöglicht werden.

Ein wesentlicher Vorteil des neuen Beleuchtungssystems mit einem Laser als Beleuchtungsquelle besteht in einer konstanten Bestrahlungsstärke unabhängig vom Winkelspektrum der Photomaskenbeleuchtung, wodurch auch für kleine Winkelspektren kurze Belichtungszeiten möglich sind. Experimentell konnte so eine Verringerung der Belichtungszeit bis zu einem Faktor 20 unter Verwendung des neuen Beleuchtungssystems im Vergleich zu Belichtungen mittels konventioneller Quecksilberdampflampe ermöglicht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Machbarkeitsnachweis des neuen Beleuchtungssystems erbracht. In Zukunft können fortführende und neue Belichtungskonzepte erarbeitet werden. So könnte beispielsweise mit dem kombinierten Einsatz einer verfahrenbaren Photomaske mit einer

lokal modulierten Laserintensität Grautonlithografie großflächig noch effizienter ermöglicht werden, was mit anderen Herstellungsverfahren nicht gewährleistet ist.

Innerhalb der letzten 20 Jahre hat sich die Mask Aligner Lithografie bedeutend weiter entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit konnten neue technologische Geräteerweiterungen sowie Methoden erarbeitet werden, die zur Erzeugung einer Primärstruktur für ein breites Spektrum verschiedener Elemente beitragen, wofür die Herstellung exemplarischer Strukturen wie z.B. geblazte Gitter, die isolierte L-Struktur oder das 3x3 Array von Kreisflächen präsentiert wurde. Neuartige Photomasken-Technologien sowie die dynamische Definition des Winkelspektrums im neuen Beleuchtungssystem mit einem Laser als Belichtungsquelle ermöglichen ein neues Level an Flexibilität der Mask Aligner Lithografie.

Nichtsdestotrotz sind die Möglichkeiten des Photomaskendesigns oder des Beleuchtungssystems bei weitem nicht erschöpft. Eine weitere Belichtungsmethode könnte z.B. ein LED-Array darstellen, bei dem mittels einzeln ansteuerbarer LEDs oder Pixel das Winkelspektrum der Photomaskenbeleuchtung selektiv definiert werden könnte [11, 12]. Für eine Erhöhung der Auflösung durch die Verringerung der Wellenlänge bieten z.B. DUV-LEDs [13] neues Potenzial.

Auch die Nutzung moderner Optimierungsmethoden, wie die des maschinellen Lernens [14], kann in Zukunft signifikant zur Weiterentwicklung des Photomaskendesigns und damit zur Mask Aligner Lithografie beitragen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] S. Harris, „Lasers in Medicine,“ *SPIE Professional Magazine*, Januar 2011.
- [2] J. Lawrence, J. Pou, D. Low und E. Toyserkani, *Advances in Laser Materials Processing. Technology, Research and Application.*, Woodhead Publishing, 2010.
- [3] R. Gast, „Spektrum.de,“ Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, [Online]. Available: <https://www.spektrum.de/news/nobelpreis-in-physik-fuer-revolution-in-der-lasertechnik/1595276>. [Zugriff am 4 Oktober 2018].
- [4] H. Herzig, *Micro-Optics*, Taylor & Francis Ltd., 1997.
- [5] S. Sinzinger und J. Jahn, *Microoptics*, Weinheim: Wiles-VCH, 2003.
- [6] C. Mack, *Fundamental Principles of Optical Lithography*, John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
- [7] R. Voelkel, „Wafer-scale micro-optics fabrication,“ *Adv. Opt. Techn. Vol. 1*, pp. 135-150, 2012.
- [8] L. G. Villanueva, J. Bausells und J. Brugger, „Grand Challenge in N/MEMS,“ *frontiers in Mechanical Engineering Vol. 1(15)*, 2016.
- [9] L. Stuerzebecher, F. Fuchs, U. Zeitner und A. Tuennermann, „High-resolution proximity lithography for nano-optical components,“ *Microelectron. Eng. Vol. 132*, pp. 120-134, 2015.
- [10] Y. Bourgin, D. Voigt, T. Käsebier, E.-B. Kley und U. D. Zeitner, „Periodic sub-100nm structures fabricated by proximity i-line mask-aligner lithography (and self-aligned double patterning),“ *Proc. of SPIE Vol. 9780*, p. 978014, 2016.
- [11] Osram Press Releases, „New automotive lighting revolutionizes road safety,“ OSRAM Group Website, 10 07 2016. [Online]. Available: <https://www.osram-group.de/media/press-releases/pr-2016/07-10-2016>. [Zugriff am 5 November 2018].
- [12] I. Moreno, „Image-like illumination with LED arrays: design,“ *Optics Letters Vol. 37(5)*, pp. 839-841, 2012.
- [13] LEWA GmbH, „LEWA,“ [Online]. Available: <https://www.lewa.de/de/kompetenz/technologien/deep-uv-led/>. [Zugriff am 6 Oktober 2018].
- [14] S. Lan, J. Liu, Y. Wang, K. Zhao und J. Li, „Deep learning assisted fast mask optimization,“ *Proc. of SPIE Vol. 10587*, pp. 105870H-1, 2018.
- [15] M. Mulder, A. Engelen, O. Noordman, R. Kazinczi, G. Streutker, B. v. Driehuisen, S. Hsu, K. Gronlund, M. Degünther, D. Jürgens, J. Eisenmenger, M. Patra und A. Major, „Performance of a Programmable Illuminator for generation of Freeform Sources on high NA immersion systems,“ *Proc. of SPIE Vol. 75200Y*, 2009.

-
- [16] Max-Planck-Gesellschaft, „Entspiegelt wie ein Mottenauge,“ 9 September 2008. [Online]. Available: <https://www.mpg.de/566079/pressemitteilung200809091>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
 - [17] Fraunhofer Gesellschaft, „Facettenaugen für Industrie und Smartphone,“ 3 Januar 2017. [Online]. Available: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2017/januar/facettenaugen-fuer-industrie-und-smartphone.html>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
 - [18] Viaoptik GmbH, „Produkte - Kunststoffoptik,“ [Online]. Available: <http://www.viaoptic.de/inhalt/produkte/kunststoffoptik.html>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
 - [19] „Photonics Online - Micro Optics To Support Shrinking Medical Devices,“ [Online]. Available: <https://www.photonicsonline.com/doc/micro-optics-expanding-to-support-shrinking-medical-devices-0001>. [Zugriff am 15 mai 2018].
 - [20] „PC & Tech Authority Magazine - What are... carbon nanotubes?,“ [Online]. Available: <https://www.pcauthority.com.au/feature/what-are-carbon-nanotubes-414451>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
 - [21] „Universität Bayreuth - Photonischer Effekt,“ [Online]. Available: http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/photon_effekt/photonischer_effekt.htm. [Zugriff am 15 Mai 2018].
 - [22] Universität Kiel, „Optical MEMS,“ [Online]. Available: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semitech_en/kap_7/illustr/i7_1_4.html. [Zugriff am 15 Mai 2018].
 - [23] Fraunhofer ISE, „Examples of photonic microstructures,“ [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/solar-thermal-technology/material-research-and-optics/microstructured-surfaces/beispiele-photonischer-mikrostrukturen.html>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
 - [24] SUSS MicroOptics SA, „Products,“ [Online]. Available: <https://www.suss-microoptics.com/en/products>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
 - [25] H. P. Herzig, A. Schilling, L. Stauffer, U. Vokinger und M. Rossi, „Efficient beamshaping of high-power diode-lasers using micro-optics,“ *Proc. of SPIE Vol. 4437*, 2001.
 - [26] T. Weber, H.-J. Fuchs, H. Schmidt, E.-B. Kley und A. Tünnermann, „Wire-grid polarizer for the UV spectral region,“ *Proc. of SPIE Vol. 7205*, p. 720504 , 2009.
 - [27] K. Dietrich, C. Menzel, D. Lehr, O. Puffky, U. Hübner, T. Pertsch, A. Tünnermann und E.-B. Kley, „Elevating optical activity: Efficient on-edge lithography of three-dimensional starfish metamaterial,“ *Appl. Phys. Lett. Vol. 104 (19)*, p. 193107, 2014.
 - [28] M. Hunt und R. Hunt, „Virology, Chapter 13, Influenza Virus,“ [Online]. Available: <http://www.microbiologybook.org/mhunt/flu.htm>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
 - [29] T. Splettstoesser, „Adenovirus 3D schematic,“ [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Adenovirus_3D_schematic.png. [Zugriff am 15 Mai 2018].

- [30] M. Wisniewska, „Rote Blutzellen,“ [Online]. Available: <https://de.dreamstime.com/stockfoto-rote-blutzellen-image61290>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
- [31] „WiseGEEK. What is Enteric Bacteria?,“ [Online]. Available: <http://www.wisegeekhealth.com/what-is-enteric-bacteria.htm#>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
- [32] „Bacteriophage lambda,“ [Online]. Available: http://cronodon.com/BioTech/Virus_Tech_2.html. [Zugriff am 14 September 2017].
- [33] H. Eckstein, „Jahresbericht - Deterministische Diffraktiv-Refraktiv-Hybrid Diffusoren,“ *Fraunhofer IOF - Jahresbericht 2015*, p. 40, 2015.
- [34] T. Glaser, „High-end spectroscopic diffraction gratings: design and manufacturing,“ *Adv. Opt. Techn. Vol. 4(1)*, pp. 25-46, 2015.
- [35] O. Homburg, F. Kubacki, D. Hauschild und V. Lissotschenko, „Efficient beam shaping for high-power laser applications,“ *Laser Technik Journal Vol. 4(1)*, pp. 44-47, 2007.
- [36] S. Walden, „Mashable "MEMS: The micro-machines inside your most beloved technologies",“ 2015. [Online]. Available: <http://mashable.com/2015/01/14/mems/#RPhwNiGJZiqm>. [Zugriff am 12 Juli 2018].
- [37] G. Pitcher, „newelectronics,“ 20 Juni 2015. [Online]. Available: <http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/optical-and-mems-technologies-combining-to-enable-new-applications/86152/>. [Zugriff am 12 Juli 2018].
- [38] W. Ehrfeld und U. Ehrfeld, „Progress and profit through micro technologies. Commercial applications of MEMS / MOEMS,“ *Proc. of SPIE Vol. 4557*, 2001.
- [39] O. Riemer, „Advances in Ultra Manufacturing,“ in *Japan Society of Precision Manufacturing Spring meeting*, 2011.
- [40] M. Madou, Fundamentals of Microfabrication, Florida: CRC Press LLC, 1997.
- [41] A. A. Tseng, „Recent developments in micromilling using focused ion beam technology,“ *J. Micromech. Microeng. Vol. 14*, pp. R15-R34, 2004.
- [42] S. Reyntjens und R. Puers, „A review of focused ion beam applications in microsystem technology,“ *J. Micromech. Microeng. Vol. 11*, pp. 287-300, 2001.
- [43] E. Ebraert, B. Gökçe, S. V. Vlierberghe, M. Vervaeke, P. Meyer, M. Guttmann, P. Dubruel, H. Thienpont und J. V. Erps, „Deep proton writing with 12 MeV protons for rapid prototyping of microstructures in polymethylmethacrylate,“ *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. Vol. 15(4)*, p. 044501, 2016.
- [44] J. V. Erps, M. Vervaeke, C. Debaes, H. Ottevaere, A. Hermanne und H. Thienpont, „Deep Proton Writing: A Rapid Prototyping Tool for Polymer Micro-Optical and Micro-Mechanical Components,“ in *Rapid Prototyping Technology - Principles and Functional Requirements*, Intech, 2011, pp. 339-362.

- [45] F. Watt, M. B. H. Breese, A. A. Bettiol und J. A. v. Kan, „Proton beam writing,“ *materials today Vol. 10 (6)*, pp. 20-29, 2007.
- [46] M. Altissimo, „E-beam lithography for micro-/nanofabrication,“ *Biomicrofluidics Vol. 4*, pp. 3-6, 2010.
- [47] S. Saha und M. Culpepper, „Characterization of the Dip Pen Nanolithography Process for Nanomanufacturing,“ *Journal of Manufacturing Science and Engineering Vol. 133*, p. 041055, 2011.
- [48] R. Garcia, A. W. Knoll und E. Riedo, „Advanced scanning probe lithography,“ *Nature Nanotechnology Vol. 3*, pp. 577-587, 2014.
- [49] H. Ulrich, R. Wijnaendts-van-Resandt, C. Rensch und W. Ehrensperger, „Direct writing laser lithography for production of microstructures,“ *Microelectron. Eng. Vol. 6*, pp. 77-84, 1987.
- [50] A. Ostendorf und B. N. Chichkov, „Two-Photon Polymerization: A New Approach to Micromachining,“ *Photonics Spectra*, 2006.
- [51] F. Burmeister, S. Steenhusen, R. Houbertz, T. Asche, J. Nickel, S. Nolte, N. Tucher, P. Josten, K. Obel, H. Wolter, S. Fessel, A. Schneider, K.-H. Gärtner, C. Beck, P. Behrens, A. Tünnermann und H. Walles, „Two-photon polymerization of inorganic-organic polymers for biomedical and microoptical applications,“ in *Optically Induced Nanostructures: Biomedical and Technical Applications*, Berlin, De Gruyter, 2015, p. Chapter 5.
- [52] K. Obata, A. El-Tamer, L. Koch, U. Hinze und B. N. Chichkov, „High-aspect 3D two-photon polymerization structuring with widened objective working range (WOW-2PP),“ *Light: Science & Applications Vol. 2*, 2013.
- [53] S. Maruo, K. Ikuta und T. Ninagawa, „Multi-polymer microstereolithography for hybrid opto-MEMS,“ in *The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Schweiz, 2001.
- [54] F. Kotz, K. Arnold, W. Bauer, D. Schild, N. Keller, K. Sachsenheimer, T. M. Nargang, C. Richter, D. Helmer und B. E. Rapp, „Three-dimensional printing of transparent fused silica glass,“ *Nature Vol. 544*, pp. 337-339, 2017.
- [55] Nanoscribe GmbH, „Nanoscribe, Additive Manufacturing,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.nanoscribe.de/en/technology/additive-manufacturing/>. [Zugriff am 12 Juli 2018].
- [56] W. Chang, K. Yoon, J. Kim, B. Shin und K. Whang, „Study on micro-optic fabrication using laser ablation process,“ *Proc. of SPIE Vol. 4760*, pp. 1014-1023, 2002.
- [57] K. Naessens, H. Ottevaere, P. Van Daele und R. Baets, „Flexible fabrication of microlenses in polymer layers with excimer laser ablation,“ *Appl. Surface Science Vol. 208-209*, pp. 159-164, 2003.

- [58] M. Huang, F. Zhao, Y. Cheng, N. Xu und Z. Xu, „Large area uniform nanostructures fabricated by direct femtosecond laser ablation,“ *Opt. Express Vol. 16 (23)*, pp. 19354-19365, 2008.
- [59] M. Davis, B. Dutterer, T. Suleski, J. Silny und E. Kim, „Diamond machining of diffraction gratings for spectrometers,“ *Precision Engineering Vol. 36*, pp. 334-338, 2012.
- [60] D. S. Ginger, H. Zhang und C. A. Mirkin, „The Evolution of Dip-Pen Nanolithography,“ *Angew. Chem. Int. Ed. Vol. 43*, pp. 30-45, 2004.
- [61] A. Pimpin und W. Srituravanich, „Review on Micro- and Nanolithography Techniques and their Applications,“ *Eng. Journal Vol. 16(1)*, pp. 37-55, 2012.
- [62] J. Bruning, „Optical Lithography ... 40 years and holding,“ *Proc. of SPIE Vol. 6520*, p. 652004, 2007.
- [63] T. Hattori, H. Mekaru und Y. Utsumi, „An approach to three-dimensional microstructure fabrication utilizing hard x-ray lithography of synchrotron radiation,“ *Review of Scientific Instruments Vol. 73*, p. 1376, 2002.
- [64] J. R. Maldonado und M. Peckerar, „X-ray lithography: Some history, current status and future prospects,“ *Microelec. Eng. Vol. 161*, pp. 87-93, 2016.
- [65] R. Buczyński, R. Kasztelaniec, I. Kujawa, A. Waddie, M. Taghizadeh und R. Stępień, „Hot embossing technology for development of glass microoptics with broadband transmission in visible and mid infrared ranges,“ *Microoptics Conference (MOC)*, 2013.
- [66] T. Glinsner und G. Kreindl, „Nanoimprint Lithography,“ in *Lithography*, InTech, 2010, pp. 495-516.
- [67] J. A. Rogers und R. G. Nuzzo, „Recent progress in soft lithography,“ *Materials today. Vol. 8(2)*, pp. 50-56, 2005.
- [68] D. Qin, Y. Xia und G. M. Whitesides, „Soft lithography for micro- and nanoscale patterning,“ *Nature Protocols 5*, pp. 491-502, 2010.
- [69] S. Jones, „SemiWiki: 14nm 16nm 10nm and 7nm - What we know now,“ 04 Juli 2017. [Online]. Available: <https://www.semiwiki.com/forum/content/6713-14nm-16nm-10nm-7nm-what-we-know-now.html>. [Zugriff am 15 August 2018].
- [70] WikiChip, „10 nm lithography process,“ [Online]. Available: https://en.wikichip.org/wiki/10_nm_lithography_process. [Zugriff am 15 Februar 2018].
- [71] T. Knieling, M. Shafi, W. Lang und W. Benecke, „Microlens array production in a microtechnological dry etch and reflow process for display applications,“ *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public. Vol. 7, 12007*, 2012.
- [72] P. Nussbaum, R. Völkel, H.-P. Herzig, M. Eisner und S. Haselbeck, „Design, fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems,“ *Pure Appl. Opt. Vol. 6*, pp. 617-636, 1997.
- [73] C.-P. Lin, H. Yang und C.-K. Chao, „Hexagonal microlens array modeling and fabrication using a thermal reflow process,“ *J. Micromech. Microeng. Vol. 13*, pp. 775-781, 2003.

-
- [74] D. Daly, R. Stevens, M. Hutley und N. Davies, „The manufacture of microlenses by melting photoresist,“ *Meas. Sc. Technol.* 1, pp. 759-766, 1990.
 - [75] P. Ruffieux, T. Scharf, I. Philipoussis, H.-P. Herzig, R. Voelkel und K. J. Weible, „Two step process for the fabrication of diffraction limited concave microlens arrays,“ *Opt. Express Vol. 16(24)*, pp. 19541-19549, 2008.
 - [76] F. T. O'Neill und J. T. Sheridan, „Photoresist reflow method of microlens production, Part I: Background and experiments,“ *Optik Vol. 113(9)*, pp. 391-404, 2002.
 - [77] S. Audran, B. Mortini, B. Faure und G. Schlatter, „Dynamical formation of microlenses by the reflow method: numerical simulation and experimental study of the process fabrication,“ *J. Micromech. Microeng. Vol. 20*, p. 095008, 2010.
 - [78] P. Dannberg, G. Mann, L. Wagner und A. Braeuer, „Polymer UV-moulding for micro-optical systems and O/E-integration,“ *Proc. SPIE 4179*, pp. 137-145, 2000.
 - [79] P. Calvert, „Inkjet Printing for Materials and Devices,“ *Chem. Mater. Vol. 13(10)*, pp. 3299-3305, 2001.
 - [80] W. R. Cox, T. Chen und D. J. Hayes, „Micro-Optics Fabrication by Ink-Jet Printing,“ *Optics & Photonics News*, pp. 32-35, 2001.
 - [81] J. Alamán, R. Alicante, J. I. Peña und C. Sánchez-Somolinos, „Inkjet Printing of Functional Materials for Optical and Photonic Application,“ *Materials Vol. 9 (11)*, p. 910, 2016.
 - [82] D. L. MacFarlane, V. Narayan, W. R. Cox, T. Chen und D. Hayes, „Microjet fabrication of microlens arrays,“ *IEEE PTL Vol. 6(9)*, pp. 1112-4, 1994.
 - [83] W. Cox, D. Hayes, T. Chen, R. Hoenigman und D. MacFarlane, „Microjet Printing for Low Cost Optical Interconnects,“ *Proceedings, ISHM*, 1996.
 - [84] W. Cox, D. Hayes, T. Chen und D. Ussery, „Fabrication of micro-optics by microjet printing,“ *Proc. of SPIE Vol. 2383*, pp. 110-115, 1995.
 - [85] W. R. Cox, T. Chen, C. Guan, D. J. Hayes und R. E. Hoenigman, „Micro-jet Printing of Refractive Microlenses,“ *OSA Diffractive Optics and Micro-Optics Topical Meeting, Kailua-Kona, Hawaii*, 1998.
 - [86] D. J. Hayes und W. R. Cox, „Micro-Jet Printing of Polymers for Electronics Manufacturing,“ *IEEE Vol. 98*, pp. 168-173, 1998.
 - [87] M. Nagao, H. Okabe, K. Oyoshi und S. Sakano, „Production of Micro-Optical Lenses Using Micro-jet Drop-On-Demand,“ *Key Engineering Materials Vols. 364-366*, pp. 30-34, 2008.
 - [88] OLEDNET, „OLEDNET,“ 10 April 2017. [Online]. Available: <http://www.olednet.com/en/ink-jet-printing-oled-next-generation-large-area-display/>. [Zugriff am 30 Mai 2018].
 - [89] B.-J. d. Gans, P. Duineveld und U. Schubert, „Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments,“ *Adv. Mater. Vol. 16(3)*, pp. 203-213, 2004.

- [90] C.-H. Tien, C.-H. Hung und T.-H. Yu, „Microlens Arrays by Direct-Writing Inkjet Print for LCD Backlighting Applications,“ *J. of Display Techn. Vol. 5(5)*, pp. 147-151, 2009.
- [91] Y. Peng, R. Peng, Z. Chu, X. Zhou, Y. Zhang und T. Guo, „Fabrication of Micro-lens Arrays Based on Ink-jet Printing and Photolithographic Hole Templates for Integral Imaging 3-D Display,“ *J. of Display Techn. Vol. 12(8)*, pp. 822-827, 2016.
- [92] H. Ottevaere, R. Cox, H.-P. Herzig, T. Miyashita, K. Naessens, M. Taghizadeh, R. Völkel, H. J. Woo und H. Thienpont, „Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies,“ *J. Opt. A: Pure Appl. Opt. Vol. 8*, pp. 407-429, 2006.
- [93] Y. Jianhua, O. Wen und O. Yi, „Fabrication of a 100% fill-factor silicon microlens array,“ *J. of Semiconductors Vol. 33(3)*, 2012.
- [94] T.-H. Lin, M.-C. Lin und C.-K. Chao, „A novel and rapid fabrication method for a high fill factor hexagonal microlens array using thermal reflow and repeating spin coating,“ *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1-8, 2017.
- [95] N. F. Borrelli, *Microoptics Technology* 2nd edition, New York, U.S.A.: Marcel Dekker, 2005.
- [96] J. Bähr, U. Krackhardt und K.-H. Brenner, „Fabrication and Testing of planar Micro Lens Arrays by Ion Exchange Technique in Glass,“ *Micro- and Nano-optics for Optical Interconnection and Information Processing, Proc. SPIE Vol. 4455*, p. 281, 2001.
- [97] M. Oikawa, K. Iga, T. Sanada, N. Yamamoto und K. Nishizawa, „Array of Distributed-Index Planar Micro-Lenses Prepared from Ion Exchange Technique,“ *Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 20*, p. L296, 1981.
- [98] M. Kufner und S. Kufner, „Ion exchange technology for optical waveguides,“ *Optik & Photonik Vol. 6(4)*, pp. 32-34, 2011.
- [99] A. J. Visconti, *Design and Fabrication of Large Diameter Gradient-Index Lenses for Dual-Band Visible to Short-Wave Infrared Imaging Applications*, Rochester, New York: Doctoral Thesis, 2015.
- [100] S. Kittaka, H. Koshi, Y. Kaite, M. Toyama und N. Akazawa, „Verfahren zum Ionenaustausch optischer Gläser“. Patent DE4011969 C2, 2001.
- [101] J. v. Fraunhofer, „Kurtzer Bericht von den Resultaten neuerer Versuche über die Gesetze des Lichtes, und die Theorie derselben,“ *Ann. d. Physik Vol. 74*, pp. 337-378, 1823.
- [102] H. Rowland, „Preliminary notice of results accomplished on the manufacture and theory of gratings for optical puposes,“ *Phil. Mag. Suppl. Vol. 13*, pp. 469-474, 1882.
- [103] G. Harrison und G. Stroke, „Interferometric control of grating ruling with continuous carriage advance,“ *J. Opt. Soc. Am. Vol. 45(2)*, pp. 112-121, 1955.
- [104] G. R. Harrison, „The production of diffraction gratings I. Development of the ruling art,“ *J. Opt. Soc. Am. Vol. 39(6)*, pp. 413-426, 1949.

- [105] C. Palmer und E. Loewen, *Diffraction Grating Handbook*, 6th edition, Rochester: Newport Corp., 2005.
- [106] E. G. Loewen, „Current boundaries of mechanical ruling of gratings,“ *Proc. SPIE Vol. 315*, pp. 173-177, 1982.
- [107] C. G. Chen und M. L. Schattenburg, „A Brief History of Gratings and the Making of the MIT Nanoruler,“ *White Paper*, 2004.
- [108] Y. Shen, X. Ge, N. Fan und Y. Y. Wang, „Micro-Vibration Control for Ultra-Precision Isolation Platform of Large Grating Ruling Engine,“ *Advanced Materials Research Vol. 706-708*, pp. 1423-1427, 2013.
- [109] M. Davies, C. Evans, S. Patterson, R. Vohra und B. Bergner, „Application of precision diamond machining to the manufacture of micro-photonis components,“ *Proc. of SPIE Vol. 5183*, pp. 94-108, 2003.
- [110] R. Steinkopf, J. Hartung, J. Kinast, A. Gebhardt, S. Risse und R. Eberhardt, „Structured Surfaces on Metal Optics,“ *Proc. SPIE 9574, Material Technologies and Applications to Optics, Structures, Components, and Sub-Systems II, 957407*, 2015.
- [111] E. Brinksmeier, R. Gläbe und C. Flucke, „Manufacturing of molds for replication of micro cube corner retroreflectors,“ *Prod. Eng. Res. Devel. Vol. 2(1)*, pp. 33-38, 2008.
- [112] L. Dick, „Research results of ultra precision technology,“ JENOPTIK Polymer Systems GmbH.
- [113] L. Li, A. Y. Yi, C. Huang, D. Grewell, A. Benatar und Y. Chen, „Fabrication of diffractive optics by use of slow tool servo diamond turning process,“ *Opt. Eng., Vol. 45(11)*, p. 113401, 2006.
- [114] D. L. Trumper und X. Lu, „Fast Tool Servos: Advances in Precision, Acceleration, and Bandwidth,“ *The 11th International Conference on Precision Engineering*, p. 641, 2006.
- [115] F. Tian, Z. Yin und S. Li, „Fast tool servo diamond turning of optical freeform surfaces for rear-view mirrors,“ *Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol. 80(9)*, pp. 1759-1765, 2015.
- [116] S. Scheiding, A. Y. Yi, A. Gebhardt, L. Li, S. Risse, R. Eberhardt und A. Tünnermann, „Freeform manufacturing of a microoptical lens array on a steep curved substrate by use of a voice coil fast tool servo,“ *Opt. Express Vol. 19(24)*, pp. 23938-23951, 2011.
- [117] C. G. Blough, M. Rossi, S. K. Mack und R. L. Michaels, „Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements,“ *Appl. Opt. Vol. 36(20)*, pp. 4648-4654, 1997.
- [118] E. Brinksmeier, O. Riemer, R. Gläbe, B. Lünemann, C. Kopylow, C. Dankwart und A. Meier, „Submicron functional surfaces generated by diamond machining,“ *CIRP Annals - Manufacturing Tech. Vol. 59*, pp. pp. 535-538, 2010.
- [119] C. Falldorf, C. Dankwart, R. Gläbe, B. Lünemann, C. Kopylow und R. Bergmann, „Holographic projection based on diamond-turned diffractive optical elements,“ *Appl. Optics, Vol. 48(30)*, pp. 5782-5785, 2009.

- [120] J. Zhou, L. Li, N. Naples, T. Sun und A. Y. Yi, „Fabrication of continuous diffractive optical elements using a fast tool servo diamond turning process,“ *J. Micromech. Microeng. Vol. 23*, p. 075010, 2013.
- [121] R. Steinkopf, A. Gebhardt, S. Scheiding, M. Rohde, O. Stenzel, S. Gliech, V. Giggel, H. Löscher, G. Ullrich, P. Rucks, A. Duparre, S. Risse, R. Eberhardt und A. Tünnermann, „Metal Mirrors with Excellent Figure and Roughness,“ *Proc. of SPIE, Vol. 7102*, pp. 1020C-71020C-12, 2008.
- [122] S. Risse, A. Gebhardt, C. Damm, T. Peschel, W. Stöckl, T. Feigl, S. Kirschstein, R. Eberhardt, N. Kaiser und A. Tünnermann, „Novel TMA telescope based on ultra precise metal mirrors,“ *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter, Proc. SPIE 7010*, p. 701016, 2008.
- [123] J. Harvey und A. K. Thompson, „Scattering effects from residual optical fabrication errors,“ *International Conference on Optical Fabrication and Testing, Proc. SPIE 2576*, 1995.
- [124] F. Vega, N. Lupón, J. A. Cebrian und F. Laguarda, „Laser application for optical glass polishing,“ *Opt. Eng. Vol. 37(1)*, pp. 272-279, 1998.
- [125] E. Bordatchev, A. Hafiz und O. Tutunea-Fatan, „Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces,“ *Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol. 73(1)*, pp. 35-52, 2014.
- [126] T. W. Drueding, S. C. Fawcett, S. R. Wilson und T. G. Bifano, „Ion beam figuring of small optical components,“ *Opt. Eng. Vol. 34(12)*, pp. 3565-3571, 1995.
- [127] M. Zeuner und S. Kiontke, „Ion Beam Figuring Technology in Optics Manufacturing,“ *Optik&Photonik, Vol. 7(2)*, pp. 56-58, 2012.
- [128] Z. W. Zhong, Y. B. Tian, Y. J. Ang und H. Wu, „Optimization of the chemical mechanical polishing process for optical silicon substrates,“ *Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol. 60(9)*, pp. 1197-1206, 2012.
- [129] D. Golini, W. Kordonski, P. Dumas und S. Hogan, „Magnetorheological Finishing in commercial precision optics manufacturing,“ *Proc. SPIE 3782*, 1999.
- [130] M. Beier, S. Scheiding, A. Gebhardt, R. Loose, S. Risse, R. Eberhardt und A. Tünnermann, „Fabrication of high precision metallic freeform mirrors with Magnetorheological Finishing (MRF),“ *Proc. SPIE 8884*, 2013.
- [131] J. E. DeGroote, H. J. Romanofsky, I. A. Kozhinova, J. M. Schoen und S. D. Jacobs, „Polishing PMMA and Other Optical Polymers with Magnetorheological Finishing,“ *LLE Review Vol. 96*, pp. 239-249.
- [132] L. Li, J. S. A. Collins und A. Y. Yi, „Optical effect of surface finish by single point diamond machining,“ *ASPE Proc., Optics Fab.*, 2007.
- [133] B. Light, „Role of Surface Roughness In Optical Performance,“ *Optimax Systems*, pp. 2-4, 2011.
- [134] A. A. Maradudin, *Light Scattering and Nanoscale Surface Roughness*, Springer US, 2007.

-
- [135] Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, „Fraunhofer IOF, Asphärische Spiegel,“ [Online]. Available: <https://www.iof.fraunhofer.de/content/dam/iof/de/documents/pb/asphaerische-spiegel-d.pdf>. [Zugriff am 12 Juli 2018].
 - [136] K. F. Beckstette, „Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung am Beispiel von Lithografieoptiken,“ *Technisches Messen Vol. 69(12)*, pp. 526-534, 2002.
 - [137] T. J. Rinke und C. Koch, Fotolithografie, Grundlagen der Mikrostrukturierung, Ulm: MicroChemicals, 2017.
 - [138] R. Steingrüber, M. Ferstl und W. Pilz, „Micro-optical elements fabricated by electron-beam lithography and dry etching technique using top conductive coatings,“ *Microelec. Eng. Vol. 57-58*, pp. 285-189, 2001.
 - [139] B. Schnabel, „Microlithographic Pattern Generation for Optics,“ in *Microoptics*, New York, Springer-Verlag, 2004, pp. 29-41.
 - [140] V. R. Manfrinato, L. Zhang, D. Su, H. Duan, R. G. Hobbs, E. A. Stach und K. K. Berggren†, „Resolution Limits of Electron-Beam Lithography toward the Atomic Scale,“ *Nano Lett. Vol. 13 (4)*, pp. 1555-1558, 2013.
 - [141] C. Vieu, F. Carcenac, A. Pépin, Y. Chen, M. Mejias, A. Lebib, L. Manin-Ferlazzo, L. Couraud und H. Launois, „Electron beam lithography: resolution limits and applications,“ *Appl. Surface Science Vol. 164(1-4)*, pp. 111-117, 2000.
 - [142] T. Weichelt, Y. Bourgin, M. Banasch und U. Zeitner, „Advanced photomask fabrication by e-beam lithography for mask aligner applications,“ *Proc. SPIE 10032, 32nd European Mask and Lithography Conference, 1003204*, 2016.
 - [143] U. Hübner, M. Falkner, U. Zeitner, M. Banasch, K. Dietrich und E.-B. Kley, „Multi-tencil character projection e-beam lithography – a fast and flexible way for high quality optical metamaterial,“ *Proc. SPIE Vol. 92310E*, 2014.
 - [144] U. Zeitner, T. Harzendorf, F. Fuchs, M. Banasch, H. Schmidt und E.-B. Kley, „Efficient fabrication of complex nano-optical structures by E-beam lithography based on character projection,“ *Proc. SPIE Vol. 8974, 89740G*, 2014.
 - [145] E. Platzgummer, C. Klein und H. Loeschner, „Electron multibeam technology for mask and wafer writing at 0.1 nm address grid,“ *Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, Vol. 12(3)*, p. 031108, 2013.
 - [146] M. Esashi, A. Kojima, N. Ikegami, H. Miyaguchi und N. Koshida, „Development of massively parallel electron beam direct write lithography using active-matrix nanocrystalline-silicon electron emitter arrays,“ *Microsystems & Nanoengineering Vol. 1*, p. 15029, 2015.
 - [147] M. A. Gully-Santiago, D. T. Jaffe, C. B. Brooks, D. W. Wilson und R. E. Muller, „High Performance Si Immersion Gratings Patterned with Electron Beam Lithography,“ *Proc. of SPIE Vol. 9151*, pp. 91515K-1-13, 2014.

- [148] M. T. Gale, M. Rossi, J. Pedersen und H. Schütz, „Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists,“ *Opt. Eng. Vol. 33(11)*, pp. 3556-3566, 1994.
- [149] H.-C. Eckstein, U. Zeitner, R. Leitel, M. Stumpf, P. Schleicher, A. Braeuer und A. Tuennermann, „High dynamic grayscale lithography with an LED based micro-image,“ *Proc. of SPIE Vol. 9780*, pp. 9780T-1-7, 2016.
- [150] D. Radtke und U. D. Zeitner, „Laser-lithography on non-planar surfaces,“ *Opt. Express Vol. 15(3)*, pp. 1167-1174, 2007.
- [151] A. Stefani, M. Stecher und G. E. Town, „Direct Writing of Fiber Bragg Grating in Microstructured Polymer Optical Fiber,“ *IEEE Photonics Techn. Letters Vol. 24(13)*, pp. 1148-1150, 2012.
- [152] M. Worgull, M. Schneider, M. Heilig, A. Kolew, H. Dinglreiter und J. Mohr, „Replication of optical components by hot embossing,“ *Micro-Optics, Proc. SPIE 7716*, p. 771604, 2010.
- [153] H. Schiff und A. Kristensen, „Nanoimprint Lithography - Patterning of Resists Using Molding,“ in *Handbook of Nanotechnology*, Springer Verlag, 2010, pp. 271-312.
- [154] S. Chou und P. Krauss, „Imprint lithography with sub-10nm feature size and high throughput,“ *Microelectronic Eng. Vol. 35*, pp. 237-240, 1997.
- [155] M. D. Austin, H. Ge, W. Wu, M. Li, Z. Yu, D. Wasserman, S. A. Lyon und S. Y. Chou, „Fabrication of 5 nm linewidth and 14 nm pitch features by Nanoimprint lithography,“ *Appl. Phys. Letters Vol. 84 (26)*, pp. 5299-5301, 2004.
- [156] G. M. Whitesides und Y. Xia, „Soft Lithography,“ *Angew. Chem. Int. Ed. 37*, pp. 550-575, 1998.
- [157] A. Cattoni, J. Chen, D. Decanini, J. Shi und A.-M. Haghiri-Gosnet, „Soft UV Nanoimprint Lithography: A Versatile Tool for Nanostructuration at the 20nm Scale,“ *Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications*, pp. 139-156, 2011.
- [158] Nanotipos, „Market & Application Focus,“ [Online]. Available: <http://www.nanotipos.com/portal/applications/>. [Zugriff am 07 Juli 2018].
- [159] „EV Group - Photonic Devices,“ EVG, [Online]. Available: https://www.evgroup.com/de/solutions/photonic_devices/imprint_lithography/. [Zugriff am 07 Juli 2018].
- [160] M. Rumler, M. Foerthner, L. Baier, P. Evanschitzky, M. Becker, M. Rommel und L. Frey, „Large area manufacturing of plasmonic colour filters using substrate conformal imprint lithography,“ *Nano Futures Vol. 1(1)*, p. 015002, 2017.
- [161] A. Albrecht, X. Wang, H. Mai, T. Schotzko, I. Memon, M. Bartels, M. Hornung und H. Hillmer, „High Vertical Resolution 3D Nanoimprint Technology and its Application in Optical Nanosensors,“ *Nonlinear Optics and Quantum Optics Vol. 43*, pp. 339-353, 2011.
- [162] M. T. Gale, „Replicated Diffractive Optics and Micro-Optics,“ *Optics & Photonics News*, pp. 24-29, 2003.

- [163] M. Rothschild, „Projection optical lithography,“ *materials today Vol. 8(2)*, pp. 18-24, 2005.
- [164] T. Matsuyama, Y. Ohmura und D. M. Williamson, „The Lithographic Lens: its history and evolution,“ *Proc. of SPIE Vol. 6154*, p. 615403, 2006.
- [165] E. Moore, „Cramming more components onto integrated circuits,“ *Electronics Vol. 38 (8)*, 1965.
- [166] SUSS MicroTec, „Manual Mask Aligner MJB4,“ 04/2003.
- [167] B. Meliorisz, S. Partel, T. Schnattinger, T. Fühner, A. Erdmann und P. Hudek, „Investigation of high-resolution contact printing,“ *Microelec. Eng. Vol. 85*, pp. 744-748, 2008.
- [168] A.-. K. Wong, Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography, Bellingham, Washington: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001.
- [169] W. Däschner, P. Long, R. Stein, C. Wu und S. Lee, „Cost-effective mass fabrication of multilevel diffractive optical elements by use of a single optical exposure with a gray-scale mask on high-energy beam-sensitive glass,“ *Appl. Optics Vol. 36 (20)*, pp. 4675-4680, 1997.
- [170] E. Stankevičius, M. Gedvilas, B. Voisiat, M. Malinauskas und G. Račiukaitis, „Fabrication of periodic micro-structures by holographic lithography,“ *Lithuanian Journal of Physics, Vol. 53(4)*, pp. 227-237, 2013.
- [171] J.-H. Seo, J. H. Park, S.-I. Kim, B. J. Park, Z. Ma, J. Choi und B.-K. Ju, „Nanopatterning by Laser Interference Lithography: Applications to Optical Devices,“ *J. Nanosci. Nanotechnol. Vol. 14 (2)*, pp. 1521-1532, 2014.
- [172] A. J. Wolf, H. Hauser, V. Kübler, C. Walk, O. Höhn und B. Bläsi, „Origination of nano- and microstructures on large areas by interference lithography,“ *Microelectronic Engineering Vol. 98*, pp. 293-296, 2012.
- [173] C. P. Fucetola, H. Korre und K. K. Berggren, „Low-cost interference lithography,“ *J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 27(6)*, pp. 2958-2961, 2009.
- [174] F. Koch, B. M., D. Lehr, M. Schnabel, M. Helgert, R. Fechner, F. Frost und T. Glaser, „Variety of gratings manufactured by interference lithography,“ *Asian J. of Phy. Vol. 25 (7)*, pp. 881-894, 2016.
- [175] K. Lucas, C. Cork, B. Yu, G. Luk-Pat, B. Painter, A. Miloslavsky und D. Pan, „Triple patterning in 10nm node metal lithography,“ 26 November 2012. [Online]. Available: <http://spie.org/newsroom/4539-triple-patterning-in-10nm-node-metal-lithography?SSO=1>. [Zugriff am 15 Februar 2018].
- [176] SUSS MicroTec SE, „MA300 GEN2 Mask-Aligner,“ [Online]. Available: <https://www.suss.com/de/produkte-loesungen/mask-aligner/ma300-gen2>. [Zugriff am 15 August 2018].

- [177] SUSS MicroOptics SA, „Applications,“ [Online]. Available: https://www.suss-microoptics.com/en/applications#anchor_photolithography. [Zugriff am 15 August 2018].
- [178] JENOPTIK AG, „High-precision Refractive Optical Elements (ROEs) for Diverse Applications with High Efficiency,“ [Online]. Available: <https://www.jenoptik.com/products/optical-systems/optical-precision-components/refractive-optical-components-roe-micro-optics>. [Zugriff am 15 August 2018].
- [179] Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, „Mikrooptik-Module,“ [Online]. Available: <https://www.iof.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/optische-komponenten-und-systeme/mikrooptik-module.html>. [Zugriff am 15 August 2018].
- [180] D. Toennies, „Photo-Lithography Trends: Diversity and Standards,“ *Advanced Packaging*, p. 32, 2008.
- [181] R. Voelkel, U. Vogler, A. Bich, K. J. Weible, M. Eisner, M. Hornung, P. Kaiser, R. Zoberbier und E. Cullmann, „Illumination system for a microlithographic contact and proximity exposure apparatus“. Patent EP 09169158.4, 2009.
- [182] J. W. S. Rayleigh, „Investigations in optics, with special reference to the spectroscope,“ *Philosophical Magazine Vol. 8 (49)*, pp. 261-274, 1879.
- [183] R. Voelkel, U. Vogler, A. Bich, P. Pernet, K. J. Weible, M. Hornung, R. Zoberbier, E. Cullmann, L. Stuerzebecher, T. Harzendorf und U. D. Zeitner, „Advanced mask aligner lithography: New illumination system,“ *Opt. Express Vol. 18*, pp. 20968-20978, 2010.
- [184] R. Voelkel, „Micro-Optics: Enabling Technology for Illumination Shaping in Optical Lithography,“ *SPIE Adv. Litho., Opt. Microlitho. XXVII*, pp. 9052-67, 2014.
- [185] G. Brooker, *Modern Classical Optics*, Oxford UK: Oxford University Press, 2003.
- [186] A. Koehler, „Ein neues Beleuchtungsverfahren für mikrophotographische Zwecke,“ *Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie und mikroskopische Technik*, pp. 433-440, 1893.
- [187] S. Hansen, M. Conradi und G. Fink, „Method and device for active wedge error compensation between two objects that can be positioned substantially to parallel to each other“. Patent US20120299208 A1, 29 Nov. 2012.
- [188] E. Storace, „SUSS Smile Technology - Large Area Imprint, a Solution for Patterning of Micro and Nano Features,“ *SUSS report V2*, pp. 20-24, Nov 2014.
- [189] T. Harzendorf, L. Stuerzebecher und U. Zeitner, „Novel gap alignment sensor for high-resolution proximity lithography,“ *Proc. of SPIE 8428*, pp. 842815-1, 2012.
- [190] IVAM Research, „Normen und Standards für die Mikrosystemtechnik - Bedarf, Strategien, Maßnahmen,“ Selbstverlag, Dortmund, 2010.
- [191] F. M. Schellenberg, „A History of Resolution Enhancement Technology,“ *Optical Review Vol. 12(2)*, pp. 83-89, 2005.

-
- [192] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson und J. Albert, „Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask“, *Appl. Phys. Lett. Vol. 63(10)*, pp. 1035-1037, 1993.
 - [193] S. Dewra, V. Grover und A. Grover, „Fabrication and Applications of Fiber Bragg Grating- A Review“, *Adv. Eng. Tec. Appl. Vol. 4(2)*, pp. 15-25, 2015.
 - [194] J.-M. Verdiell, T. Koch, D. Tennant, K. Feder, R. Gnall, M. Young, B. Miller, U. Koren, M. Newkirk und B. Tell, „8-wavelength DBR laser array fabricated with a single-step Bragg grating printing technique“, *IEEE Photonics Technology Letters Vol. 5(6)*, pp. 619-621, 1993.
 - [195] E. B. Kley und T. Clausnitzer, „E-beam lithography and optical near field lithography: new prospects in fabrication of various grating structures“, *Proc. SPIE Vol. 5184*, pp. 115-125, 2003.
 - [196] Y. Bourgin, T. Käsebier und U. D. Zeitner, „250 nm period grating transferred by proximity i-line mask-aligner lithography“, *Opt. Letters Vol. 39(6)*, pp. 1665-1668, 2014.
 - [197] M. Okai und T. Harada, „Novel method to fabricate corrugation for distributed feedback lasers using a grating photomask“, *International Conference on the Application and Theory of Periodic Structures, Proc. SPIE 1545*, 1991.
 - [198] D. Tennant, K. Feder, K. Dreyer, R. Gnall, T.L.Koch, U. Koren, B. Miller und M. Young, „Phase Grating Masks for Photonic Integrated Circuits Fabricated by E-Beam Writing and Dry Etching: Challenges to Commercial Applications“, *Microelectr. Eng. Vol. 27*, pp. 427-434, 1995.
 - [199] D. S. Hobbs, B. D. MacLeod, A. F. Kelsey, M. A. Leclerc und E. Sabatino, „Automated-interference-lithography-based systems for generation of submicron-feature size patterns“, *Micromachine Technology for Diffractive and Holographic Optics, Proc. SPIE 3879*, 1999.
 - [200] K. Kukuchi, „Phase shift mask, method of exposure, and method of producing semiconductor devices“. US Patent 0177051 A1, 2002.
 - [201] G. Talor, „Transparent phase shift mask for fabrication of small feature sizes“. US Patent 6933085 B1, 2005.
 - [202] Toppan Photomask Inc., „Photomasks“, [Online]. Available: <https://www.photomask.com/products/phase-shift-masks>. [Zugriff am 6 Mai 2018].
 - [203] H. F. Talbot, „Facts Relating to Optical Science, No. IV,“, *Phil. Mag. Vol. 9*, pp. 401-407, 1836.
 - [204] J. T. Winthrop und C. R. Worthington, „Theory of Fresnel Images. I. Plane Periodic Objects in Monochromatic Light“, *J. Opt. Soc. Am. Vol. 55(4)*, pp. 373-381, 1965.
 - [205] T. Suleski, Y.-C. Chuang, P. Deguzman und R. Barton, „Fabrication of optical microstructures through fractional Talbot imaging“, *Proceedings of SPIE Vol. 5720*, pp. 86-93, 2005.

- [206] L. Stuerzebecher, T. Harzendorf, U. Vogler, U. Zeitner und R. Voelkel, „Advanced mask aligner lithography: Fabrication of periodic patterns using pinhole array mask and Talbot effect,“ *Opt. Express Vol. 18(19)*, pp. 19485-19494, 2010.
- [207] T. Harzendorf, L. Stürzebecher, U. Vogler, U. Zeitner und R. Völkel, „Half-tone proximity lithography,“ *Proc. SPIE 7716, 77160Y*, 2010.
- [208] H. Solak, C. Dais und F. Clube, „Displacement Talbot lithography: a new method for high-resolution patterning of large areas,“ *Opt. Express Vol. 19(11)*, pp. 10686-10691, 2011.
- [209] M. Fritze, B. M. Tyrrell, D. K. Astolfi, R. D. Lambert, D.-R. W. Yost, A. R. Forte, S. G. Cann und B. D. Wheeler, „Subwavelength Optical Lithography with Phase-Shift Photomask,“ *Lincoln Laboratory Journal Vol. 14(2)*, pp. 237-250, 2003.
- [210] P. Werbaneth, „What Is Computational Lithography and How Does It Keep Moore’s Law Alive?,“ 9 April 2013. [Online]. Available: <http://www.semi.org/en/node/45241>. [Zugriff am 5 September 2018].
- [211] Y. Li, S.-M. Yu und Y.-L. Li, „Intelligent optical proximity correction using genetic algorithm with model- and rule-based approaches,“ *Computational Materials Science Vol. 45(1)*, pp. 65-76, 2009.
- [212] M. Motzek, U. Vogler, M. Hennemeyer, M. Hornung, R. Voelkel, A. Erdmann und B. Meliorisz, „Computational algorithms for optimizing mask layouts in proximity printing,“ *Microelectr. Engineering Vol. 88*, pp. 2066-2069, 2011.
- [213] K. Motzek, A. Bich, A. Erdmann, M. Hornung, M. Hennemeyer, B. Meliorisz und U. Hofmann, „Optimization of illumination pupils and mask structures for proximity printing,“ *Microelectr. Eng. Vol. 87*, pp. 1164-1167, 2010.
- [214] K. Motzek, S. Partel, U. Vogler und A. Erdmann, „Numerical optimization of illumination and mask layout for the enlargement of process windows and for the control of photoresist profiles in proximity printing,“ *Proc. of SPIE Vol. 8171, 81710K*, 2011.
- [215] K. Motzek, S. Partel, A. Bramati, U. Hofmann, N. Ünal, M. Hennemeyer, M. Hornung, A. Heindl, M. Ruhland, A. Erdmann und P. Hudek, „Mask aligner lithography simulation – From lithography simulation to process validation,“ *Microelectr. Engineering Vol. 98*, pp. 121-124, 2012.
- [216] R. Voelkel, U. Vogler, A. Bramati, T. Weichelt, U. Z. L. Stuerzebecher, K. Motzek, A. Erdmann, M. Hornung und R. Zoberbier, „Advanced Mask Aligner Lithography (AMALITH),“ *Proc. SPIE 8326-69*, 2012.
- [217] GenISys GmbH, „OPC for Mask Aligner,“ [Online]. Available: <https://www.genisys-gmbh.com/web/applications/opc-for-mask-aligner.html>. [Zugriff am 5 September 2018].
- [218] T. Fühner, A. Erdmann und S. Seifert, „Direct optimization approach for lithographic process conditions,“ *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS Vol. 6(3)*, p. 031006, 2007.

-
- [219] H. Kawano, H. Ito, K. Mizuno, T. Matsuzaka, K. Kawasaki, N. Saitou, H. Ohta und Y. Sohda, „Development of an electron-beam lithography system for high accuracy masks,“ *Journal of Vacuum Science and Technology B Vol. 21(2)*, pp. 823-827, 2003.
 - [220] M. Mueller, S. Komarov und K.-H. Baik, „Dry etching of chrome for photomasks for 100-nm technology using chemically amplified resist,“ *Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology IX, Proc. SPIE 4754*, 2002.
 - [221] W. W. Flack, K. E. Tokunaga und K. D. Edwards, „Chrome dry etching for photomask fabrication,“ *12th Annual BACUS Symposium, SPIE Vol. 1809*, pp. 85-96, 1992.
 - [222] G. Dahm, I. Rangelow, P. Hudek und H. Koops, „Quartz etching for phase shifting masks,“ *Microelectr. Engineering Vol. 27*, pp. 263-266, 1995.
 - [223] M. Moharam, T. Gaylord, E. Grann und D. Pommet, „Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings,“ *J. Opt. Soc. Am. A Vol. 12(5)*, pp. 1068-1076, 1995.
 - [224] E. Popov, M. Nevière, B. Gralak und G. Tayeb, „Staircase approximation validity for arbitrary shaped gratings,“ *J. Opt. Soc. Am. A Vol. 19(1)*, pp. 33-42, 2002.
 - [225] L. Stuerzebecher, F. Fuchs, T. Harzendorf und U. D. Zeitner, „Pulse compression grating fabrication by diffractive proximity photolithography,“ *Optics Letters Vol. 39(4)*, pp. 1042-1045, 2014.
 - [226] L. Stuerzebecher, F. Fuchs, T. Harzendorf, S. Meyer und U. D. Zeitner, „Application of rigorously optimized phase masks for the fabrication of binary and blazed gratings with diffractive proximity lithography,“ *Proc. SPIE 8974*, p. 897415, 2014.
 - [227] S. C. Barden, J. A. Arns und W. S. Colburn, „Volume-phase holographic gratings and their potential for astronomical applications,“ *Proc. SPIE Vol. 3355*, pp. 866-876, 1998.
 - [228] P. Triebel, T. Moeller, T. Diehl, M. Burkhardt, L. Erdmann und A. Gatto, „Optical Diffraction Gratings for Spectroscopic Instruments,“ *Optik & Photonik*, Nr. 2, pp. 41-44, 2016.
 - [229] M. Christophersen und B. F. Philips, „Gray-tone lithography using an optical diffuser and a contact aligner,“ *Appl. Phys. Lett. Vol. 92(19)*, p. 194102, 2008.
 - [230] M. B. Stern, „Pattern transfer for diffractive and refractive microoptics,“ *Microelectron. Eng. Vol. 34(3-4)*, pp. 299-319, 1997.
 - [231] C. Du, X. Dong, Q. Deng, L. Shi, X. Luo und Y. Zhang, „Micro-optical devices formed by a dynamic photolithographic approach,“ *J. Opt. A, Pure Appl. Opt. Vol. 10(6)*, p. 064007, 2008.
 - [232] B. H. Kleemann, „Perfect blazing with echelle gratings in TE and TM polarization,“ *Optics Letters Vol. 37(6)*, pp. 1002-1004, 2012.
 - [233] T. Rasmussen, *White Paper: The benefits of transmission grating based spectroscopy*, Ibsen Photonics, 2010.

- [234] N. Ebizuka, T. Okamoto, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki und W. Aoki, „Novel diffraction gratings for next generation Spectrographs with high spectral dispersion,“ *Proc. of SPIE Vol. 9912, 99122Z-1*, 2016.
- [235] M. Oliva, *High efficiency blazed gratings in resonance domain*, Jena: Dissertation, 2014.
- [236] H. Rathgen und H. L. Offerhaus, „Large bandwidth, highly efficient optical gratings through high index materials,“ *Opt. Express Vol. 17(6)*, pp. 4268-4283, 2009.
- [237] T. Clausnitzer, *Kontrolle der Beugungseffizienzen dielektrischer Gitter*, Jena: Dissertation, 2007.
- [238] T. Fujita, H. Nishihara und J. Koyama, „Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography,“ *Opt. Lett. Vol. 7(12)*, pp. 578-580, 1982.
- [239] R. Murali, D. K. Brown, K. P. Martin und J. D. Meindl, „Process optimization and proximity effect correction for grey scale e-beam lithography,“ *J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 24(6)*, pp. 2936-2939, 2006.
- [240] M. Oliva, D. Michaelis, T. Benkenstein, J. Dunkel, T. Harzendorf, A. Matthes und U. D. Zeitner, „Highly efficient three-level blazed grating in the resonance domain,“ *Opt. Lett. Vol. 35(16)*, pp. 2774-2776, 2010.
- [241] E. Kley und B. Schnabel, „E-beam lithography: a suitable technology for fabrication of high-accuracy 2D and 3D surface profiles,“ *Proc. of SPIE Vol. 2640*, pp. 71-80, 1995.
- [242] O. W. Sandfuchs, C. Schwanke, M. Burkhardt, F. Wyrowski, A. Gatto und R. Brunner, „Modelling adapted to manufacturing aspects of holographic grating structures,“ *Journal Of The European Optical Society - Rapid Publications Vol. 6*, pp. 11006-10, 2011.
- [243] C. K. Wu, „Method of making high energy beam sensitive glasses“. U.S. Patent 5,078,771, 1992.
- [244] C. F. Guo, S. Cao, P. Jiang, Y. Fang, J. Zhang, Y. Fan, Y. Wang, W. Xu, Z. Zhao und Q. Liu, „Grayscale photomask fabricated by laser direct writing in metallic nano-films,“ *Opt. Express Vol. 17(22)*, pp. 19981-19987, 2009.
- [245] J. Zhang, C. Guo, Y. Wang, J. Miao, Y. Tian und Q. Liu, „Micro-optical elements fabricated by metal-transparent-metallic-oxides grayscale photomasks,“ *Appl. Optics Vol. 51(27)*, pp. 6606-6611, 2012.
- [246] F. Quentel, J. Fieret, A. S. Holmes und S. Paineau, „Multilevel diffractive optical element manufacture by excimer laser ablation and halftone masks,“ *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VI, Proc. SPIE 4274*, 2001.
- [247] Y. Oppliger, P. Sixt, J. M. Stauffer, J. M. Mayor, P. Regnault und G. Voirin, „One-step 3D shaping using a gray-tone mask for optical and microelectronic applications,“ *Microelectronic Engineering Vol. 23*, p. 449-454, 1994.
- [248] J. Wengelink und H. Engel, „Fabrication of Waveguide Tapers by Semitransparent Mask Photolithography,“ *Microelectronic Engineering Vol. 30*, pp. 137-140, 1996.

-
- [249] D. A. Pommet, M. G. Moharam und E. B. Grann, „Limits of scalar diffraction theory for diffractive phase elements,“ *J. Opt. Soc. Am. A Vol. 11(6)*, pp. 1827-1834, 1994.
 - [250] U. Levy, E. Marom und D. Mendlovic, „Thin element approximation for the analysis of blazed gratings: simplified model and validity limits,“ *Opt. Communications Vol. 229*, pp. 11-21, 2004.
 - [251] G. Swanson, „Binary Optics Technology: Theoretical Limits on the Diffraction Efficiency of Multilevel Diffractive Optical Elements,“ Lincoln Laboratory , Lexington, Massachusetts, 1991.
 - [252] R. Magnusson und T. Gaylord, „Equivalence of multiwave coupled-wave theory and modal theory for periodic-media diffraction,“ *J. Opt. Soc. Am. Vol. 68(12)*, pp. 1777-1779, 1978.
 - [253] M. G. Moharam und T. K. Gaylord, „Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings,“ *J. Opt. Soc. Am. Vol. 72(10)*, pp. 1385-1392, 1982.
 - [254] J. Turunen, „Diffraction Theory of Microrelief Gratings,“ in *Micro-optics*, Taylor & Francis Ltd, 1997, pp. 31-52.
 - [255] O. Sandfuchs, D. Plätz, S. Sinzinger, A. Pesch und R. Brunner, „Analysis of the influence of the passive facet of blazed transmission gratings in the intermediate diffraction regime,“ *J. Opt. Soc. Am. A Vol. 25(8)*, pp. 1885-1893, 2008.
 - [256] MicroChemicals GmbH, „Microchemicals. Development of Photoresist,“ 07 11 2013. [Online]. Available: http://www.microchemicals.com/technical_information/development_photoresist.pdf. [Zugriff am 21 Juni 2018].
 - [257] I. Ichikawa und T. Baba, „Efficiency enhancement in a light-emitting diode with a two-dimensional surface grating photonic crystal,“ *Appl. Phys. Letters Vol. 84*, pp. 457-9, 2004.
 - [258] A. A. Erchak, D. J. Ripin, S. Fan, P. Rakich und J. D. Joannopoulos, „Enhanced coupling to vertical radiation using a two-dimensional photonic crystal in a semiconductor light-emitting diode,“ *Appl. Phys. Letters Vol. 78*, pp. 563-5, 2001.
 - [259] Y. Chen, L. Li und A. Y. Yi, „Fabrication of precision 3D microstructures by use of a combination of ultraprecision diamond turning and reactive ion etching process,“ *J. Micromech. Microeng. Vol. 17*, pp. 883-890, 2007.
 - [260] micro resist technology GmbH, „OrmoComp,“ [Online]. Available: <http://www.microresist.de/de/produktwelt/hybridpolymere/uv-imprint-uv-abformung/ormocomp%C2%AE>. [Zugriff am 21 Juni 2018].
 - [261] B. S. PLC, „Variable-efficiency diffraction grating.“. Patent European Patent 2752691 A1, 2014.
 - [262] Q. Yang und W. Wang, „Compact cross-dispersion device based on a prism and a plane transmission grating,“ *Journal of Modern Optics Vol. 65(9)*, pp. 1081-1089, 2018.

- [263] T. Feger, „Konstruktion und Entwicklung eines Echelle-Spektrographen,“ *VdS-Journal für Astronomie* Nr. 30, pp. 22-26, 2009.
- [264] G. Bourdarot, E. L. Coarer, E. Alecian, P. Rabou und X. Bonfils, „Nano-VIPA: a miniaturized high-resolution echelle spectrometer, for the monitoring of young stars from a 6u cubesat,“ *Proc. of SPIE Vol. 10562*, pp. 10562D-1-9, 2016.
- [265] M. Köhler, *Etching in Microsystem Technology*, Weinheim: Wiley-VCH, 1999.
- [266] IBSEN Photonics A/S, „NIR Spectrometer grating for 1300-1800 nm,“ [Online]. Available: <https://ibsen.com/products/transmission-gratings/spectrometer-gratings/spectrometer-gratings-nir/nir-966-lmm/>. [Zugriff am 20 Juli 2018].
- [267] IBSEN Photonics A/S, „XNIR Spectrometer grating for 1100-2200 nm,“ [Online]. Available: <https://ibsen.com/products/transmission-gratings/spectrometer-gratings/spectrometer-gratings-nir/xnir-459-lmm/>. [Zugriff am 20 Juli 2018].
- [268] S. Bühling, F. Wyrowski, E.-B. Kley, A. J. M. Nellissen, L. Wang und M. Dirkwager, „Resolution enhanced proximity printing by phase and amplitude modulating masks,“ *J. Micromech. Microeng.* Vol. 11(5), pp. 603-611, 2001.
- [269] G. A. Cirino, R. D. Mansano, P. Verdonck, L. Cescato und L. G. Neto, „Diffractive phase-shift lithography photomask operating in proximity printing mode,“ *Opt. Express* Vol. 18(16), pp. 16387-16405, 2010.
- [270] M. D. Levenson, N. S. Viswanathan und R. A. Simpson, „Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask,“ *IEEE Trans. Electron Devices* Vol. 29(12), pp. 1828-1836, 1982.
- [271] M. Skeren, I. Richter und P. Fiala, „Iterative Fourier transform algorithm: comparison of various approaches,“ *Journal of Modern Optics* Vol. 49(11), pp. 1851-1870, 2002.
- [272] S. Bühling, *Projektionsalgorithmen in wellenoptischen Transmissionsdesigns*, Jena: Dissertation, 2003.
- [273] L. G. Gubin, B. T. Polyak und E. V. Raik, „The method of projections for finding the common point of convex sets,“ *USSR Comput. Mathematics and Mathematical Physics* Vol. 7(6), pp. 1-24, 1967.
- [274] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, 1968.
- [275] B. Meliorisz, *Simulation of Proximity Printing*, Dissertation, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [276] K.-H. Brenner und W. Singer, „Light propagation through microlenses: a new simulation method,“ *Appl. Opt.* Vol. 32(26), pp. 4984-4988, 1993.
- [277] S. Schmidt, T. Tiess, S. Schröter, R. Hambach, M. Jäger, H. Bartelt, A. Tünnermann und H. Gross, „Wave-optical modeling beyond the thin-element-approximation,“ *Opt. Express* Vol. 24(26), pp. 30188-30200, 2016.
- [278] L. G. Neto, P. Cardona, G. A. Cirino, R. D. Mansano und P. Verdonck, „Design, fabrication and characterization of a full complex-amplitude modulation diffractive optical

- element," *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems Vol. 2(2)*, pp. 96-104, 2003.
- [279] J. P. Gambino, S. A. Adderly und J. U. Knickerbocker, „An overview of through-silicon-via technology and manufacturing challenges," *Microelectr. Eng. Vol. 135*, pp. 73-106, 2015.
- [280] H. Schimmel und F. Wyrowski, „Non-paraxial Laser Beam Shaping," *Proceedings of SPIE Vol. 5456*, pp. 0277-786X, 2004.
- [281] J. Jahns und W. Däschner, „Precise alignment through thick wafers using an optical copying technique," *Opt. Lett. Vol. 17*, pp. 390-392, 1992.
- [282] M. Gruber, D. Hagedorn und W. Eckert, „Precise and simple optical alignment method for double-sided lithography," *Appl. Opt. Vol. 40 (28)*, pp. 5052-5055, 2001.
- [283] OSRAM GmbH, *Product family datasheet - Other microlithography lamps up to 1,000 W*, 2018.
- [284] Y. Muramoto, M. Kimura und S. Nouda, „Development and future of ultraviolet light-emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp," *Semicond. Sci. Technol. Vol. 29 (8)*, p. 084004, 2014.
- [285] EV Group, „EVG LED Exposure Optics," [Online]. Available: https://www.evgroup.com/en/products/lithography/photolithography/mask_aligners/evg_led_exposure_optics/?SelectedTab=1. [Zugriff am 08 Oktober 2018].
- [286] K. Schindler, U. Leischner, P. Kaiser, T. Striebel, U. Schömbis und C. Lopper, „High intensity UV-LED Mask Aligner for applications in industrial research," *SUSS Report 2017*, pp. 20-25, 2018.
- [287] S. Partel, S. Zoppel, P. Hudek, A. Bich, U. Vogler, M. Hornung und R. Voelkel, „Contact and proximity printing using 193 nm Excimer laser in Mask Aligner," *Microelectron. Eng. Vol. 87(5-8)*, pp. 936-939, 2010.
- [288] P. I. Jensen und A. Sudbo, „Bragg gratings for 1.55- μm wavelength fabricated on semiconductor material by grating-period doubling using a phase mask," *IEEE Photonics Technol. Lett. Vol. 7 (7)*, pp. 783-785, 1995.
- [289] J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics*, Greenwood Village: Roberts and Company Publishers, 2007.
- [290] W.-F. Hsu und C.-F. Yeh, „Speckle suppression in holographic projection displays using temporal integration of speckle images from diffractive optical elements," *Appl. Optics Vol. 50 (34)*, pp. H50-H55, 2011.
- [291] S. Lowenthal und D. Joyeux, „Speckle Removal by a Slowly Moving Diffuser Associated with a Motionless Diffuser," *Journal of the Opt. Soc. America Vol. 61 (7)*, pp. 847-851, 1971.
- [292] F. Riechert, *Speckle Reduction in Projection Systems*, Karlsruhe: Dissertation, 2009.

- [293] B. Koek, „ASML Holistic Lithography, Semicon West,“ 14 July 2009. [Online]. Available: <https://www.asml.com/asml-holistic-lithography/en/s38884>. [Zugriff am 15 Mai 2018].
- [294] F. M. Dickey, *Laser Beam Shaping - Theory and Techniques*, Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [295] R. Shechter, Y. Amitai und A. A. Friesem, „Compact beam expander with linear gratings,“ *Appl. Optics Vol. 41(7)*, pp. 1236-1240, 2002.
- [296] F. Duerr und H. Thienpont, „Refractive laser beam shaping by means of a functional differential equation based design approach,“ *Opt. Express Vol. 22 (7)*, pp. 8001-8011, 2014.
- [297] J. R. Fienup, „Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms,“ *Opt. Eng. Vol. 19*, pp. 297-305, 1980.
- [298] F. Wyrowsky und O. Bryngdahl, „Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography,“ *J. Opt. Soc. Am. A Vol. 5 (7)*, pp. 1058-1065, 1988.
- [299] M. Rossi, H. Rudmann, B. Marty und A. Maciossek, „Wafer scale micro-optics replication technology,“ *Proc. of SPIE, 0277-786X*, pp. 148-154.
- [300] D. Rittenhouse, „Explanation of an optical deception,“ *Trans. Amer. Phil. Soc. Vol. 2*, pp. 37-42, 1786.
- [301] E. Cullmann, „Verfahren zur Nahfeldbelichtung mit im wesentlichen parallelem Licht“. Patent DE19810055A1, 1998.
- [302] Canyon Materials, Inc., „Properties of HEBS-Glass,“ [Online]. Available: http://www.canyonmaterials.com/prop_hebs1.html. [Zugriff am 25 Januar 2018].
- [303] TechTerms, „CMOS Definition,“ [Online]. Available: <https://techterms.com/definition/cmos>. [Zugriff am 6 Mai 2018].
- [304] C.-K. Wu, „High energy beam sensitive glasses“. USA Patent 4670366, 06 Februar 1987.

Abkürzungsverzeichnis

AAPSM	engl. Alternating Aperture Phase Shift Mask
ASPW	engl. Angular Spectrum of Plane Waves, Spektrum ebener Wellen
BO	Beugungsordnung
CMOS	engl. Complementary metal-oxide-semiconductor
DOE	engl. Diffractive Optical Element, Diffraktives optisches Element
DOF	engl. Depth of Focus, Schärfentiefe
FIB	engl. Focused Ion Beam, fokussierter Ionenstrahl, Ionenfeinstrahlanlage
FWHM	engl. Full width at half maximum, Halbwertsbreite
FZP	Fresnelzonenplatte
HEBS	engl. High Energy Beam Sensitive (Glas)
IC	engl. Integrated Circuit, integrierter Schaltkreis
IFP	engl. Illumination Filter Plate, Beleuchtungsblende
MO	Mikrooptik
NA	Numerische Apertur
NIR	Nahes Infrarot, Bereich des elektromagnetischen Spektrums
PEB	engl. Post-Exposure Bake, Tempern im Anschluss an eine Belichtung
RCWA	engl. Rigorous Coupled-Wave Analysis
RDL	engl. Redistribution Layer, Umverdrahtungsebene
REM	Rasterelektronenmikroskop
RET	engl. Resolution Enhancement Technique
RIE	engl. Reactive-ion etching, Reaktives Ionenätzen
OPC	engl. Optical Proximity Correction, Nahbereichskorrektur
SMO	engl. Source-Mask-Optimization, Quelle-Maske-Optimierung
SRAF	engl. Sub-resolution assist feature
TE/TM	Transversal elektrisch/transversal magnetisch
TEA	engl. Thin-Element-Approximation, Dünne Elemente-Näherung
TSV	engl. Through-Silicon-Via, Durchkontaktierung
UV	Ultraviolett, Bereich des elektromagnetischen Spektrums
VIS	Visueller Bereich des elektromagnetischen Spektrums
WPM	engl. Wave-Propagation Method

Symbolverzeichnis

$b / \mu\text{m}$	(Struktur-)Breite
$d / \mu\text{m}$	Proximity-(Maske-Substrat-)Abstand
$d_T / \mu\text{m}$	Talbot-Abstand
D / Jcm^{-2}	Bestrahlungs-(Belichtungs-)dosis
E_e / Wcm^{-2}	Bestrahlungsdosis
f / mm	Brennweite
f / s^{-1}	Frequenz
$h / \mu\text{m}$	(Struktur-)Höhe
l_b / nm	Linienabstand
l_s / nm	Linienbreite
m	Beugungsordnung
n	Brechungsindex
p / nm	Periode
$r_n, r_n' / \text{nm}$	Eckenradius Photoresiststruktur
t_B / s	Belichtungszeit
$x, y / \mu\text{m}$	laterale Ausdehnung
$z / \mu\text{m}$	Propagationslänge/-richtung
α_B / deg	Blazewinkel
$\alpha_{\text{inc}} / \text{deg}$	Einfallswinkel
β / deg	Ablenkwinkel
γ_m / deg	Beugungswinkel
$\eta / \%$	Beugungseffizienz
δ_B / deg	Rückflankenwinkel
π	Kreiszahl, mathematische Konstante
φ / rad	Phasenverschiebung
τ / ns	Pulslänge
$v_{x/y} / \text{deg}$	Winkelspektrum
λ / nm	Wellenlänge

Anhang

Prozess	Anlagentechnologie	Typisch lateral kleinste Strukturgröße	Strukturen/Elemente	Bemerkungen	Referenzen
Mechanische Strukturierung					
Ritzen	Gitterteilmaschine	≈ 10.800 Linien/mm	Gitter (Binär, Blaze, Sinus)	Hohe Auflösung, geringe Gittergeister/Streulicht	Palmer et al. [105] E.G. Loewen [106] Chen et al. [107]
Ultrapräzisionsbearbeitung (Drehen, Fräsen, Meißeln,...)	CNC-Maschinen	≈ 250 Linien/mm, ≈ 200 nm Subgeometrie	Gitter, Linsen, Linsenarray, Freiformflächen	Sehr gute Oberflächengüte, periodisches Drehmuster	O. Riemer [39] Davies et al. [59] [109] Steinkopf et al. [110] Scheiding et al. [116]
Lithografische Strukturierung					
Interferenzlithografie (Holografie)	Laserstrahlquelle/ Optiksystem	< 100 nm	Gitter, Photonische Kristalle, Solarzellen, Polarisatoren	Kaum Streulicht, große Flächen, nur periodische Strukturen	T. Glaser [34] Wolf et al. [172]
Direktschreibend					
Ionenstrahlolithografie (FIB)	Ionenquelle/-beschleuniger	≈ 1 nm	Maskenreparatur, Mikrofluidik, Strukturanalyse	Forschung + Entwicklung	Tseng et al. [41] Reyntjens et al. [42]
Protonenlithografie	Synchrotron	< 100 nm	Linsen, Spiegel, Prismen	Grundlagenforschung, hohe Aspektverhältnisse, Glatte Seitenwände, geringe Kantenrauheit	Erps et al. [44] Watt et al. [45]
Elektronenstrahl-lithografie	Elektronenquelle/-beschleuniger	< 5 nm	Gitter, Photomasken, Photonische Kristalle, ICs		Schnabel et al. [139] Manfrinato et al. [140] Hübner et al. [143]

Prozess	Anlagentechnologie	Typisch lateral kleinste Strukturgröße	Strukturen/Elemente	Bemerkungen	Referenzen
Rastersondenlithografie (Scanning-Probe/Dip-Pen)	AFM	< 100 nm	Bio-Elektronik, Sensorik		Saha et al. [47] Pimpin et al. [61]
Laserstrahlschreiben	Laserstrahlquelle / Leuchtdioden	$\approx 1 \mu\text{m}$	Linsen, DOEs, Strahlformer, CGHs		Ulrich et al. [49] Gale et al. [148] Eckstein et al. [149]
Maskenbasiert					
Röntgen(tiefen)lithografie	Synchrotron	< 50 nm	LIGA Verfahren	Hohe Auflösung, hohe Schärfentiefe, tiefe Strukturen	Hattori et al. [63] Maldonado et al. [64]
Nanoprägelithografie (UV/Heißprägen)		20 - 50 nm	Solarzellen, Filter, Polarisatoren,	Maske = Stempel, Replikationsverfahren	Buczynski et al. [65] Glinsner et al. [66] Cattoni et al. [157]
Softlithografie		10 – 50 nm	Fluidik, Elektronik	Maske = Stempel, Replikationsverfahren, Auch für gekrümmte OF,	Rogers et al. [67] Whitesides et al. [156]
Photolithografie (Projektion)	Stepper, Scanner	< 25 nm	CPU, ICs, Elektronik	Halbleiter-optimierte Prozesse	C. Mack [6] J. H. Bruning [62] S. Jones [69]
Photolithografie (Schattenwurflitho.)	Mask Aligner	Kontakt: 200 nm Proximity: 75 nm	Gitter, MEMS, MOEMS, LED, Polarisatoren,	Einfache Handhabung, Wafer-Level	Stürzebecher et al. [9] M. J. Madou [40] Meliorisz et al. [167]

Additiv direkt-strukturierend					
2-Photonen-Polymerisation (2PP) (3D Laserlithografie)	(UV-)Laser	100 – 200 nm	Lab-on-Chip Systeme, MEMS, Nanoantennen, photonische Kristalle	3D Strukturen, Rapid Prototyping	Ostendorf et al. [50] Burmeister et al. [51]
Mikrostereolithografie	LED/Laser	1 – 5 µm	Mikrofluidik, MEMS, µRobotik, µLinsen	3D Strukturen, vgl. „Solid Ground Curing“ (SGC), Rapid Prototyping	Kotz et al. [54] Nanoscribe [55]
Subtraktiv direkt-strukturierend					
Laserablation		≈ 200 nm	Linsen/-arrays, MEMS, Formwerkzeuge, Wellenleiter	Keine Reinraumtechnologie	Chang et al. [56] Huang et al. [58]
Spezialverfahren					
Ionenaustausch	z.T. Photolithografie		Linsen/-arrays, GRIN-Linsen, Wellenleiter		Kufner et al. [98] Kittaka et al. [100]
Photothermische Effekte	Photolithografie	≈ 50 µm	Linsen		Ottevaere et al. [92] N. F. Borelli [95]
Linsenschmelzen	Photolithografie	≈ 1 µm	Linsen/-arrays		Knieling et al. [71] Nussbaum et al. [72] Lin et al. [94]
Ink-/Micro-Jet	Photolithografie	≈ 10 µm	Linsen/-arrays, Wellenleiter, LEDs		Calvert et al. [79] Cox et al. [85] Tien et al. [90]

Tabelle 1 : Übersicht einer Auswahl an wichtigen Herstellungstechnologien für mikrooptische Strukturen

Technologie	Anlagenkosten / €	Hersteller
UP-Drehmaschine	300.000 – 1 Mio.	LT Ultra, Precitech/ Ametek, Schneider, Moore Nanotech. Systems
Laserschreiber	200.000 – 5 Mio.	Heidelberg Instruments, MYCRONIC, Nanoscribe, 4Pico
Elektronenstrahlschreiber	2 - 20 Mio.	Vistec, JEOL, Mapper, Canon, NuFlare
Interferenzlithografie	1.000 (lowcost [173]) – xx Mio.	Keine Standardprodukte, oder spezifische Hersteller
Stepper/Scanner (Back-End)	800.000 – 3,5 Mio.	SMEE, Ultratech, RUDOLPH, Canon
Mask Aligner	150.000 – 1 Mio.	SUSS MicroTech, EVG, USHIO, Midas

Tabelle 1: Übersicht und Vergleich aktueller Anlagenkosten und repräsentativer Hersteller für eine Auswahl bedeutender Technologien zur Herstellung mikrooptischer Strukturen. Das Spektrum der Anlagenkosten beinhaltet Geräte für Forschung und Entwicklung bis hin zu industriellen Einsatzbereichen. Verschiedene Komponenten haben Einfluss auf individuelle Anlagenkosten. Einflussreiche Komponenten sind z.B.: Beleuchtung, Substratgröße, Messtechnik, Optik, Automatische/Manuelle Steuerungen etc..

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen herzlich bedanken, die mich in den letzten Jahren, auf dem Weg meiner Promotion unterstützt und zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben, jeder auf eine individuelle Art und Weise.

Prof. Andreas Tünnermann danke ich für die vertrauensvolle Annahme als Doktorandin und die Möglichkeit zur Promotion am IAP. Einen besonderen Dank gilt Uwe Zeitner, der mich im Anschluss an meine Masterarbeit in der Schweiz in seiner Arbeitsgruppe am IOF willkommen hieß und mir die Chance zur Promotion eröffnete. Danke für das entgegengebrachte Vertrauen und die stetige Unterstützung während meiner Arbeit. Es hat mir viel bedeutet, Dich als Mentor für die Promotion an der Seite zu wissen.

Ein weiterer großer Dank richtet sich an alle Kollegen und Ex-Kollegen vom IAP und Fraunhofer IOF, die an der Herstellung diverser (mikrooptischer) Elemente beteiligt waren. Dazu zählen insbesondere Michael Banasch für alle Hilfestellungen hinsichtlich Elektronenstrahlanlage, Antje Oelschläger sowie Robert Kinder für die unterstützenden Waferbelackungen, André Matthes und Thomas Käsebier für die unkomplizierte Umsetzung meiner Ätzwünsche, Peter Dannberg für Abformungen, sowie Natalie Sergeev für die zahlreichen REM und FIB Analysen meiner Proben. In diesen Zusammenhang möchte ich mich auch bei Robert Leitl bedanken, der mir ebenfalls beratend und unterstützend für die technologische Entwicklung zur Seite stand. Generell möchte ich mich bei meinen Kollegen am Fraunhofer IOF für die angenehme Arbeitsweise im CMN-Team sowie im Reinraum 13 bedanken.

Weiterhin möchte ich mich besonders bei Torsten Harzendorf bedanken, nicht nur für die fachliche sowie technologische Unterstützung, sondern auch für die Motivation und die gelegentliche Funktion als Kummerkasten. Bernd Höfer möchte ich danken für seine unkomplizierte und fachliche Unterstützung für Konstruktion und Systemintegration. Axel Bodemann danke ich für seine hilfreiche Expertise im Optikdesign. Ebenso möchte ich Ralf Steinkopf für den hilfreichen Dialog zum Thema Ultrapräzisionsbearbeitung danken.

Meinen Ex-Kollegen Frank Fuchs sowie Lorenz Stürzebecher gilt ebenfalls mein Dank. Die von Frank bereitgestellte Software war ein Grundstein und ein bedeutendes Tool für meine Simulationen. Lorenz gilt ein großer Dank vor allem für die anfängliche thematische und Reinraum bezogene Einarbeitung sowie die erhellenden Diskussionen.

Darüber hinaus möchte ich mich auch bei den Kollegen von SUSS Microoptics in der Schweiz bedanken. Mit der Möglichkeit meiner Masterarbeit haben Sie mir das Thema der optischen Lithografie zugänglich gemacht und mir so die Tür zur Promotion geöffnet. Mein spezieller Dank richtet sich in diesen Zusammenhang an Reinhard Völkel. Reinhard, Danke für die Motivation

und die Bestärkung in meiner Arbeit. Uwe Vogler möchte ich ebenfalls für die unkomplizierte Zusammenarbeit auch nach dem Master danken.

Neben all der fachlichen Unterstützung bin ich meinen Kollegen genauso dankbar für die motivierenden Worte oder den Erfahrungsaustausch hinsichtlich dem Erlebnis Promotion. Dabei sind speziell die Kollegen der gemeinsamen Mittagsrunde Markus Gräfe, Daniel Richter und Martin Heusinger zu nennen. Martin, als meinen langjährigen Bürokollegen, sowie Kay Dietrich danke ich für die angenehme und unkomplizierte Arbeitsatmosphäre. Bei Holger Hartung möchte ich mich auch herzlich für seine Zeit und die damit verbundenen konstruktiven Diskussionen bedanken, die insbesondere zur Fertigstellung der schriftlichen Arbeit verhalfen.

Dafür, dass am Arbeitsplatz die Rechentechnik und die notwendige Infrastruktur funktioniert haben, möchte ich auch Bodo Martin sowie Erik Küffner (RIP) für ihr Engagement danken.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich von Herzen für die große moralische Unterstützung. Dabei gilt ein besonderer Dank meinen Eltern, sowie meiner Oma (RIP), die die Grundlegung dieses Weges ermöglichten und immer an mich glaubten. In dieser Verbindung möchte ich mich auch bei Reinhilde und Winfried Weis bedanken. Eure motivierenden Worte, sowie euer währendes Interesse an meinem Lebensweg schätze ich sehr.

Veröffentlichungen

- T. Weichelt, Y. Bourgin und U. D. Zeitner „*Mask aligner lithography using laser illumination for versatile pattern generation*,“ Opt. Express Vol. 25(18), 20983, 2017.
- T. Weichelt, Y. Bourgin, M. Banasch und U. D. Zeitner “*Advanced photomask fabrication by e-beam lithography for mask aligner applications*,“ Proc. SPIE 10032, 32nd European Mask and Lithography Conference, 1003204, 2016.
- T. Weichelt, R. Kinder und U. D. Zeitner “*Photomask displacement technology for continuous profile generation by Mask Aligner Lithography*,“ J. Opt. Vol. 18(12) 125401, 2016.
- T. Weichelt, L. Stuerzebecher, U. D. Zeitner “*Optimized lithography process for through-silicon vias-fabrication using a double-sided (structured) photomask for mask aligner lithography*,“ J. Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS Vol. 14(3), 034501, 2015.
- T. Weichelt, U. Vogler, L. Stuerzebecher, R. Voelkel und U. D. Zeitner “*Resolution enhancement for advanced mask aligner lithography using phase-shifting photomasks*,“ Opt. Express Vol. 22(13), 2014.
- M. Paster und T. Weichelt „*New Illumination Technology for Mask Aligner Lithography*,“ Optik & Photonik Vol. 13 (3), Wiley Verlag, 2018.
- T. Siefke, W. Dickmann, T. Weichelt, M. Steinert, J. Dickmann, C. B. Rojas Hurtado, B. Bodermann, und S. Kroker "Determination of structural deviations in wire grid polarizers for DUV application wavelengths by transmission spectroscopy in the visible spectral range", Proc. SPIE 10678, Optical Micro- and Nanometrology VII, 106780O, 2018.
- U. D. Zeitner, T. Weichelt, Y. Bourgin und R. Kinder „*Alternative high-resolution lithographic technologies for optical applications*,“ Proc. SPIE. 9780, Optical Microlithography XXIX, 97800R, 2016.
- K. Puthankovilakam, T. Scharf, M.-S. Kim, A. Naqavi, H.-P. Herzig, T. Weichelt, U. D. Zeitner, U. Vogler und R. Voelkel "Intensity and phase fields behind phase-shifting masks studied with high-resolution interference microscopy," Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS Vol. 15(2), 021203, 2016.
- R. Voelkel, U. Vogler, A. Bramati, T. Weichelt, L. Stuerzebecher, U.D. Zeitner, K. Motzek, A. Erdmann, M. Hornung und R. Zoberbier „*Advanced mask aligner lithography*“, Proc. SPIE 8326, Optical Microlithography XXV, 83261Y, 2012.

Konferenzteilnahme mit eigenen Beiträgen

- T. Weichelt, Y. Bourgin und U. D. Zeitner “*Laser-based illumination system for flexible mask-aligner lithography*,” Vortrag, SPIE Advanced Lithography, San Jose, 2018.
- T. Weichelt, Y. Bourgin und U. D. Zeitner „*Flexible pattern generation with laser illumination for mask aligner lithography*,” SPIE Photonics Europe, Brüssel, 2016.
- T. Weichelt, Y. Bourgin, M. Banasch und U. D. Zeitner “*Advanced photomask fabrication by e-beam lithography for mask aligner applications*,” Vortrag, 32nd European Mask and Lithography Conference (EMLC), Dresden, 2016.
- T. Weichelt, Y. Bourgin und U. D. Zeitner „*Flexible pattern generation with laser illumination for mask aligner lithography*,” Vortrag, 14th Fraunhofer IISB Lithography Simulation workshop, Hersbruck, 2016.
- T. Weichelt, Y. Bourgin und U.D. Zeitner “*Laser illumination for diffractive mask-aligner lithography: a special illumination system*,” Vortrag, SPIE Optical System Design, Jena, 2015.
- T. Weichelt, L. Stürzebecher und U.D. Zeitner “*Optimized TSV-fabrication using a double-sided (structured) photomask for mask aligner lithography*,” Posterpräsentation, SPIE Advanced Lithography, San Jose, 2015.
- T. Weichelt, L. Stürzebecher und U.D. Zeitner “*Mask aligner lithography for TSV-structures using a double-sided (structured) photomask*,” Vortrag, SPIE OPTO Photonics West, San Francisco, 2015.

Patentanmeldung

DE 10 2015 115 064 A1 2017.03.09

„Beleuchtungseinheit und Vorrichtung zur lithografischen Belichtung“

Auszeichnungen

Best Student Paper Award @ Advanced Lithography 2018 in San José

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel und Literatur angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise unentgeltlich geholfen:

1. Die für die Berechnung und Optimierung der Photomasken genutzte Software wurde von Frank Fuchs entwickelt und zur Verfügung gestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmen und Designs bauen auf die implementierten Funktionen auf.
2. Die in Kapitel 4.1.2 verwendete Photomaske wurde von Lorenz Stürzebecher berechnet und fertigen lassen. Auf Basis der mir zur Verfügung gestellten Designinformationen habe ich selbstständig Simulationen für die von mir ausgeübten Experimente durchgeführt.
3. Das Konzept des neuen Beleuchtungssystems für den Mask Aligner (Kapitel 5) wurde gemeinsam mit Uwe D. Zeitner sowie Yannick Bourgin entwickelt. Die Mechanik und Elektronik für die Realisierung der exzentrischen Rotation des Diffusors wurden in Zusammenarbeit mit Bernd Höfer erarbeitet. Der finale Aufbau des Beleuchtungssystems im Reinraum sowie die Berechnung der einzelnen optischen Komponenten erfolgten von mir eigenständig.
4. Die Anwendung der Ätztechnologie wurde von Thomas Käsebier sowie André Matthes durchgeführt. Mit ihnen zusammen wurden die notwendigen Ätzparameter erarbeitet.
5. Die Probeninspektion mittels REM und FIB wurde von Natali Sergeev sowie Torsten Harzendorf durchgeführt.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die geltende Promotionsordnung der Physikalisch-Astronomischen Fakultät ist mir bekannt.

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich nach besten Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Tina Weichert
Jena,